

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

LUTSK NATIONAL
TECHNICAL UNIVERSITY

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ
ТА ТРАНСПОРТІ**

**ADVANCES
IN
MECHANICAL ENGINEERING
AND TRANSPORT**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSN 2313-5425

№1 (26)

2026

ЛУЦЬК LUTSK

Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2026.– №1(26).– 460 с.

В матеріалах наукового журналу висвітлюються результати наукових досліджень та науково-дослідних розробок в галузі машинобудування, автомобільного транспорту, транспортних систем і транспортних технологій на автомобільному транспорті, а також, математичного та комп'ютерного моделювання технічних процесів та систем.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – КВ №20504-10304Р від 30.12.2013р.

Науковий журнал включений до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р.

Ідентифікатор медіа R30-02530 (рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення №40 від 11.01.2024 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: **Пустюльга Сергій Іванович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет.

Члени редколегії: **Аргун Щасяна Валіковна**, д.т.н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, **Бартломейчик Миколай**, доктор інженерії, Гданський технологічний університет (Республіка Польща); **Дембіцький Валерій Миколайович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Захарчук Віктор Іванович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет; **Кузькін Олексій Феліксович**, д.т.н., професор, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Кашканов Андрій Альбертович**, д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет; **Мурований Ігор Сергійович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Налобіна Олена Олександрівна**, д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, **Онищук Василь Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, **Пукальскас Саугірдас**, Doctor of Engineering, Vilnius Gediminas Technical University (Вільнюс, Литва); **Пуць Віталій Степанович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Сахно Володимир Прохорович**, д.т.н., професор, Національний транспортний університет; **Славінскас Стасіс**, д.т.н., професор, Університет Вітовта Магнуса (Каунас, Литва), **Таран Ігор Олександрович**, д.т.н., професор, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukaszewicza, (Республіка Польща), **Тарандушка Людмила Анатоліївна**, д.т.н., професор, Черкаський державний технологічний університету; **Фратіта Майкл**, доктор філософії з машинобудування, Галацький університет «Дунарея де Жос», (Галац, Румунія); **Шимчук Сергій Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, **Чабак Юлія Геннадіївна**, д.т.н., професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Друкується за рішенням вченої ради
Луцького національного технічного університету
(Протокол № 11 від 23.04.2026р.)

ЗМІСТ		CONTENT	
Хаврук В. О. Методологічний підхід до розробки робочої гіпотези удосконалення розрахунку виробничої програми з технічного обслуговування та поточного ремонту автомобільного рухомого складу в умовах автотранспортного підприємства.....	6	Khavruk V.O. Methodological approach to developing a working hypothesis for improving the calculation of the production program for maintenance and current repair of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise.....	6
А. Коробко, І. Семенов. Модель визначення ефективності транспортної системи на основі ризику втрати функціональної стабільності.....	15	Korobko A. I., Semenov I. V. A model for determining the efficiency of a transport system based on the risk of functional stability.....	15
Кирилах С.В., Капустян О.Є. Мікроструктура та механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого за технологією Wire Arc Additive Manufacturing...	25	Kyrylakha S.V., Kapustian O.Ye. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by wire arc additive manufacturing	25
Павленко О., Єлістратов В., Харьков О., Фесенко В. Алгоритми діагностування та відновлення працездатності військових автомобілів з автоматичними коробками передач.....	37	Pavlenko O.V., Yelistratov V.O., Kharkov O.A., Fesenko V.V. Diagnostic and restoration algorithms for military vehicles with automatic transmissions.....	37
Пелех О.Р., Сало Ю.М. Синергетичний синтез характеристик підвіски та пневмо-аеродинамічних систем транспортного засобу.....	44	Pelekh O. R., Salo Y. M. Synergetic synthesis of suspension characteristics and pneumatic-aerodynamic systems of a vehicle	44
Roşca-Sadurschi L., Ceclu L., Bunea M. Transformation of engineering education in the context of Industry 4.0: multi-actor perspectives and curriculum modernization outcomes	54	Roşca-Sadurschi L., Ceclu L., Bunea M. Transformation of engineering education in the context of Industry 4.0: multi-actor perspectives and curriculum modernization outcomes.....	54
Шинкарик М.М., Кравець О.І. Енергетичні втрати та екологічні наслідки роботи теплотехнічних систем	70	Shynkaryk M., Kravets O. Energy losses and environmental consequences of thermotechnical system operation	70
Сіора О.В., Юрченко Ю.В., Курило В.А., Бондарєва В.І., Бернацький А.В. Розроблення та апробація допоміжного технологічного оснащення для лазерного зварювання тонкостінних таврових з'єднань у різних просторових положеннях.....	77	Siora O.V., Yurchenko Yu.V., Kurylo V.A., Bondarieva V.I., Bernatskiy A.V. Development and testing of auxiliary technological equipment for laser welding of thin-walled T-joints in various spatial positions	77
Цопа В.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Літвінова Я.В., Клименко І.Ю. Вдосконалення процесу керування логістичними ризиками підприємств критичної інфраструктури.....	87	Tsopa V., Cheberyachko S., Deryugin O., Litvinova Ya., Klymenko I. Improvement of the logistics risk management process for critical infrastructure enterprises.....	87
Турпак С.М., Муковська Д.Я. Дослідження динаміки експортних вантажопотоків металопродукції та їх математичне моделювання в умовах нестабільного середовища.....	97	Turpak S., Mukovska D. Study of the dynamics of export metal products freight flows and their mathematical modeling under conditions of an unstable environment.....	97
Зибцев Ю.В., Ворошилов П.А. Сили опору під час керування легковим автомобілем.....	106	Zybtsev Y.V., Voroshylov P.A. Resistance forces when driving a passenger car	106
Андрусенко С., Білецький В., Бугайчук О., Подписнов В. Економічна ефективність впровадження прогностичного технічного обслуговування в міському автопарку таксі: порівняльний аналіз автомобілів Tesla Model 3 та Škoda Octavia A7.....	112	Andrusenko S., Biletskyi V., Buhaichuk O., Podpisnov V. Economic efficiency of implementation of predictive maintenance in the city taxi fleet: comparative analysis of Tesla Model 3 and Škoda Octavia A7.....	112
Бодак М.В. Аналіз переваг збільшення напруги батареї електромобілів до 800 В	121	Bodak M. Analysis of the benefits of increasing the battery voltage of electric vehicles to 800 V.....	121
Вахнюк С.А. Аналіз відомих досліджень по відключенню частини циліндрів двигуна внутрішнього згоряння при зменшенні навантажень на автомобіль	126	Vakhniuk S. Analysis of existing studies on the deactivation of some cylinders in internal combustion engines when vehicle loads decrease.....	126
Гандзюк М.О., Дембіцький В.М. Стабілізація вертикальних реакцій дороги на колеса автомобіля ...	137	Handziuk M., Dembitskiy V. Stabilization of vertical road reactions on automobile wheels	137
Гнип М.М. Дослідження основних техніко-експлуатаційних показників роботи двигуна D21A1 у процесі використання біодизельного палива на основі SME.....	145	M. Hnyp. Research of the main technical and operational indicators of the D21F1 engine in the process of using SME-based biodiesel fuel	145

Горбик Ю.В., Кривошапов С.І., Пісковський Д.С. Дослідження впливу технічного стану елементів тракту подачі повітря дизельного двигуна на витрату пального легкового автомобіля	159	Y. Gorbik, S. Krivoshapov, D. Piskovsky Research on the impact of the technical condition of diesel engine air intake system components on passenger car fuel consumption.....	159
Дитятєв О.В. Про параметри безпеки автомобіля при погіршення стану амортизатора	171	O. Dityatyev. About the safety parameters of a car in the event of a shock absorber's deterioration	171
Доля К.В. цифровий двійник мультимодального транспортного вузла для адаптивного керування пасажирськими та вантажними потоками в реальному часі.....	178	Dolia, K. Digital twin of a multimodal transport hub for adaptive management of passenger and freight flows in real time.....	178
Захарчук В.І., Захарчук О.В., Скалига М.М., Цицячук А.Л. Дослідження переобладнаного з дизеля газового двигуна на пропан-бутані	186	Zakharchuk V., Zakharchuk O., Skalyga M., Tsypiashchuk A. Research of a Diesel-to-Gas Converted Engine Operating on Propane-Butane.....	186
Кашиканов А. А., Кашиканов В. А., Варчук В. В., Дмитрієва А. В., Москалюк М. Л. Комплексний аналіз інфраструктури ринку сервісних послуг спеціалізованого рухомого складу на шасі вантажних автомобілів у Вінницькому регіоні	193	Kashkanov A., Kashkanov V., Varchuk V., Dmytriieva A., Moskaliuk M. Comprehensive Analysis of Service Infrastructure for Specialised Rolling Stock on Truck Chassis in The Vinnytsia Region	193
Козак С.В. Дослідження операцій у транспортних системах міжнародних вантажоперевезень	204	S.V. Kozak Transport efficiency, project analysis and potential of transport enterprises	204
Корпач О.А., Трубенко А.А. Експериментальні дослідження показників тягово-швидкісних властивостей легкого комерційного автомобіля	209	O. Korpach, A. Trubenok Experimental investigation of light commercial vehicle traction-speed properties.....	209
Крайник Л.В., Рубан Д.П., Сукач О.М., Миронюк О.С., Кубай О.С., Пастернак А.Я. Аналітична оцінка взаємодії шини з ґрунтовою поверхнею.....	217	Krainyk L.V., Ruban D.P., Sukach O.M., Muronyuk O.S., Kubai O.S., Pasternak A.Ya. Analytical assessment of the interaction between tyre and ground surface.....	217
Краснокутський В. М. Застосування передньої навісної системи на тракторному самохідному шасі як елементу підвищення його універсальності і ефективності.....	230	Krasnokutskiy V. M. The use of a front hitch system on a self-propelled tractor chassis to enhance its versatility and efficiency	230
Куць Н. Г. Резонансний автомобільний тепловий насос: принцип дії, ефективність та перспективи впровадження	244	Kuts N.G. Resonant automotive heat pump: principle of operation, efficiency, and implementation prospects.....	244
Мармут І.А., Зуєв В.О. Удосконалення математичних моделей взаємодії коліс автомобіля з роликівим тяговим стендом	250	Marmut I., Zuiiev V. Improvement of mathematical models of the interaction of vehicle wheels with a roller traction stand.....	250
Мельник В.М., Козак Ф.В. Дослідження економічної ефективності використання біогазового палива з товарним бензином в системі живлення ГБО 7-го покоління	264	Melnyk V., Kozak F. Research on the economic efficiency of using biogas fuel with commodity gasoline in the 7th generation hbo power supply system	264
Мельнікова Ю.І., Орда О. О. Систематизація підходів до параметричного налаштування генетичних алгоритмів для оптимізації розкладів руху громадського транспорту	274	Melnikova Yu., Orda O. Systematization of approaches to parameters settings of genetic algorithms for optimizing public transport schedules.....	274
Мисів О.О., Криштопа С.І., Добуш А.І., Сем'янчук А.І., Радзиховська Н.М. Розрахунок енергетичних витрат мобільних агрегатів технологічного транспорту	283	Mysiv O., Kryshropa S., Dobush A., Sem'yanchuk A., Radzikhovska N. Calculation of energy costs of mobile technological transport units	283
Никончук В.М. Імплементація планів сталої міської мобільності як інструмент досягнення цілі сталого розвитку 11 у містах України.....	295	Nykonchuk V. Implementation of sustainable urban mobility plans as a tool for achieving sustainable development goal 11 in cities of Ukraine	295
Олісевич М. С., Мурований І.С., Хомин Н. Я. Дослідження задоволеного попиту на паркування вантажних автомобілів залежно від місткості стоянок на автомобільній магістралі	303	Olishevich M., Murovaniy I., Khomyn N. Research on the satisfied demand for truck parking depending on the location and capacity of parking lots on the highway	303

Понталєв І.О., Давідіч Ю.О. Метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах	317	Pontaplev I., Davidich Y. Method of managing the quality level of passenger service on urban routes.....	317
Придюк В.М., Самостян В.Р. Ефективне управління міськими пасажирськими автотранспортними потоками із використанням передових методів їх прогнозування.....	326	V. Prydiuk, V. Samostian. Effective management of urban passenger road transport flows using advanced methods of their forecasting	326
Птиця Н.В. Формування ефективної системи доставки вантажів на основі оптимізації логістичних процесів.....	336	Ptytsia N.V. Formation of an effective cargo delivery system based on optimization of logistics processes.....	336
Рижий О.П., Ігнатюк Р.М., Стадник О.С., Морозюк С.В., Серілко Д.І. Кінематичний аналіз поршневого ДВЗ з коромислово-повзунним механізмом.....	342	O. Ryzhyi, R. Ihnatiuk, O. Stadnyk, S. Morozjuk, D. Serilko, Kinematic analysis of a piston internal combustion engine with a rocker-slider mechanism.....	342
Самчук Л.М., Придальний Б.І., Гулієва Н.М., Сичук В.А. Аналітичний огляд підходів до забезпечення точності позиціонування промислових роботів у зварювальних операціях..	350	L. Samchuk, B. Prydalnyi, N. Huliieva, V. Sychuk. Analytical review of approaches to ensuring positioning accuracy of industrial robots in welding operations.....	350
Сахно В.П., Маяк М.М., Хорошун Р.В., Котенко А.С. Вплив положення центру причепа шарнірно-з'єднаного автобуса на його стійкість руху.....	362	V. Sakhno, M. Mayak, R. Khoroshun, A. Kotenko The influence of the trailer center of mass displacement on the motion stability of an articulated bus.....	362
Тицький О.Ю., Токін О.П. Система діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння великовантажних автомобілів.....	373	Tytskyi O.Yu., Tokin O.P. System for diagnosing the technical condition of internal combustion engines of heavy duty vehicles.....	373
Фисун В.В. Обґрунтування необхідності введення в штат військових частин Національної Гвардії України та використання легкових причепів під час виконання бойових завдань мобільними вогневими групами	382	V. Fysun. Justification of the necessity of introducing military units of the National Guard of Ukraine and the use of light trailers during the performance of combat tasks by mobile fire groups.....	382
Холодова О.О., Бугайова М.О., Холодов О.В. Критичний аналіз методик оцінки безпеки регульованих і нерегульованих перехресть з урахуванням складності транспортних взаємодій.....	391	O. Kholodova, M. Buhaiova, O. Kholodov. Critical analysis of methods for assessing the safety of regulated and unregulated intersections, taking into account the complexity of transport interactions.....	391
Хітров І.О., Клімов С.В. Бортові інформаційно-комунікаційні системи як засіб інтеграції транспортного засобу з транспортною інфраструктурою.....	402	Khitrov I., Klimov S. On-board information and communication systems as a means of integrating vehicles with transport infrastructure.....	402
Цюман М.П., Садовник І.І. Поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки гібридного автомобіля раціональним вибором його параметрів управління.....	411	Tsiuman M.P., Sadovnyk I.I. Improvement of energy efficiency and environmental safety indicators of a hybrid vehicle through rational selection of its control parameters.....	411
Шепеленко І.В., Шумляківський В.П., Красота М.В., Осін Р.А., Червоний Т.В. Обґрунтування вибору обладнання для миття автомобілів.....	426	Shepelenko I., Shumlyakivskiy V., Krasota M., Osin R., Chervonyi T. Justification for choosing car washing equipment.....	426
Стельмащук В.В., Стельмащук С.В. Вплив зусилля у тягово-зчіпному пристрої на стійкість руху малотоннажного автопоїзда у гальмівному режимі.....	436	V.V. Stelmashchuk, S.V. Stelmashchuk Influence of the force in the traction-coupling device on the stability of a light-duty road train during braking.....	436
Волков В.П., Онищук В.П., Волкова Т.В., Павлюк В.І., Левчук М.А. Особливості створення віртуального підприємства автомобільного транспорту.....	449	V. P. Volkov, V. P. Onyshchuk, T. V. Volkova, V. I. Pavliuk, M. A. Levchuk Aspects of designing a virtual motor transport enterprise	449
Перелік рецензентів	459	List reviewers	459

Khavruk V.O.
National Transport University, Kyiv, Ukraine

METHODOLOGICAL APPROACH TO DEVELOPING A WORKING HYPOTHESIS FOR IMPROVING THE CALCULATION OF THE PRODUCTION PROGRAM FOR MAINTENANCE AND CURRENT REPAIR OF AUTOMOBILE ROLLING STOCK IN THE CONDITIONS OF A MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE

The article considers a methodological approach to improving the calculation of the production program for technical maintenance and current repair of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise. Given the diversity of modern cars in motor transport enterprises, it is proposed to use a cyclical method of calculating the production program to determine the volume of service work, which involves determining the optimal calculation cycle for performing routine service work for specific brands of cars.

A motor transport enterprise is represented by a complex structure, which includes such subsystems as: diagnostics and control; main production; auxiliary production; service production. Among them, the central place in the system of technical maintenance and current repair of vehicles is occupied by the main production, as a subsystem that performs service routine work and maintains vehicles in technically sound condition.

It has been established that the purpose of the maintenance and repair system is to ensure the required level of performance at minimal cost, which can be achieved by creating optimal capacities of subsystems for joint work and increasing their efficiency through organizational and other measures.

It was found that to ensure the required level of vehicle performance, it is necessary to calculate the throughput capacity of the main production subsystem of a motor transport enterprise using mathematical methods of the theory of mass service.

To assess the system throughput, together with the incoming flow of requirements, it is proposed to determine the duration of technical actions in the main production.

The article presents a mathematical model of the system of technical maintenance and current repair of automobiles based on the economic criterion of ensuring minimum costs or maximum specific profit.

The methodological approach to developing a working hypothesis is presented in the form of an objective function of minimizing the total costs of maintenance and current repairs of automotive rolling stock, which are performed through optimal calculated mileages – adjusted, recommended by automakers, inter-service mileages.

The purpose of the article is to clarify the indicators by which it is possible to further improve the calculation of the production program for technical maintenance and current repairs of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise.

Keywords: automobile rolling stock, production and technical base, current repairs, billing cycle, Queueing system, maintenance, labor intensity.

INTRODUCTION

Motor transport enterprises that use foreign-made trucks face a number of problems in organizing their production and technical base, namely, calculating the production program for maintenance and current repairs of automobile rolling stock. The production and technical base cannot be subjected to radical changes at once due to a number of objective reasons: insufficient funds at enterprises, uneven structure of automobile rolling stock in terms of wear and tear and its operational properties. Therefore, the adaptation of the production and technical base to modern conditions should be phased, such that it optimally takes into account the need for the necessary capacities to perform maintenance and current repairs. Technological design plays a decisive role here, one of the main stages of which is the calculation of the production program for maintenance and current repairs of automobile rolling stock.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The issues of calculating the production program for technical maintenance and current repairs of automobile rolling stock were considered in their works, in particular, by such researchers as: V. V. Bilichenko, V. I. Belov, V. P. Volkov, M. Ya. Govorushchenko, V. M. Dembitsky, I. P. Kurnikov, O. A. Ludchenko, O. V. Zakharchuk, S. I. Kryvoshapov, I. A. Marmut, V. I. Pavlyuk, V. M. Prydyuk, V. Ya. Chabannyi.

Most authors are guided by recommendations [1] and outdated methods of calculating the production program for maintenance and current repair of automobile rolling stock, which are based on regulatory indicators for a limited range of car brands. At the same time, the authors only generally indicate the main directions of improving the production and technical base of the motor transport enterprise, for example, V. Ya. Chabannyi, I. O. Osypov indicate the inconsistency of the production and technical base with the new rolling stock [2], but do not provide specific calculation formulas, and other authors do the same.

Therefore, the issue of improving the calculation of the production program for maintenance and current repairs of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise requires research, taking into account the different intervals between maintenance services and the volume of scheduled maintenance work for modern imported car brands, as well as the inexpediency of using a methodology based on regulatory indicators of outdated and currently non-existent car brands.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

To consider the issue of improving the calculation of the production program for technical maintenance and current repairs of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise based on the theory of mass service, to form an objective function for minimizing total costs for the optimal calculation cycle.

RESEARCH RESULTS

As a working hypothesis for improving the methodology for calculating the production program for maintenance and current repairs and its adaptation for a motor transport enterprise using foreign-made automobile rolling stock, the following statement is proposed: the cyclical method for calculating the production program for maintenance and current repairs of automobile rolling stock remains unchanged, but at different stages of reconstruction of the production and technical base, the value of the calculation cycle should optimally take into account the structure of the automobile fleet of the motor transport enterprise. If the motor transport enterprise has automobile rolling stock with different mileage values since the beginning of operation for the calculation cycle, of course, the mileage of effective operation of cars (mileage, exceeding which leads to a significant increase in the labor intensity of the current one) becomes important. But at the stage of commissioning new foreign-made automobiles with high resource mileage for the calculation cycle, take the mileage of cars for the full cycle of scheduled maintenance. As the average mileage of the automobile rolling stock in the motor transport enterprise increases, the value of the calculation cycle value should increase, but at the same time maintain the multiplicity of the scheduled maintenance complex, until the mileage of effective operation of the vehicle is reached. This will allow the motor transport enterprise to increase the required capacity of the production and technical base in stages without significant one-time capital investments.

It is obvious that when changing and improving the processes of technical maintenance and current repairs, it is necessary to adhere to the following basic provisions:

firstly, it is necessary to establish the compliance of the existing production and technical base and its specific elements with the standards and rules, as well as the requirements of the scientific and technological process;

secondly, it is necessary to be guided by the principle of a systemic integrated approach, the essence of which is not to establish the compliance of one or another parameter with the current standards and requirements, but to find a solution that allows not only to formally eliminate the noted deficiency, but also to find a way to improve this indicator, increase the efficiency of using each element of the existing technological potential, and achieve the best result in the development process. That is why it is necessary not only to analyze the existing conditions of the research object, but also to consider the prospects for its development. A comprehensive systemic approach does not allow the separation of these processes, that is, simultaneously with the consideration of the existing conditions, the search for ways and means of improving individual elements of the production and technical base must take place;

thirdly, the development of promising directions for the development of a motor transport enterprise requires the use of a creative approach and a certain courage in decision-making.

A motor transport enterprise can be considered as a single system for ensuring the need for transportation, consisting of two interconnected subsystems: a subsystem for organizing transportation and a subsystem for ensuring the operability of automobile rolling stock. The choice of the size of a motor transport enterprise should be made taking into account the maximum efficiency of the interaction of subsystems. Thus, if an increase in the capacity of a motor transport enterprise contributes to a decrease in the specific costs of maintaining the operability of a unit of automobile rolling stock, then in the transportation subsystem this is associated with an increase in the costs of non-productive runs of automobile rolling stock.

The maintenance and repair subsystem can also be presented as a single system that ensures a sufficient level of performance of the automotive rolling stock for the transportation process. It consists of separate subsystems (subdivisions), which, in turn, consist of lower-order subsystems or elements that cannot be further divided.

The maintenance and repair subsystem can also be presented as a single system that ensures a sufficient level of performance of the rolling stock for the transportation process. It consists of separate subsystems (subdivisions), which, in turn, consist of lower-order subsystems or elements that cannot be further divided.

In the system of technical maintenance and current repair of cars, it is possible to distinguish four subsystems that differ from each other in nature, location, organization of work, etc., having different partial and one common goal. The following subsystems are accepted as such subsystems:

- subsystem of diagnostics and control;
- subsystem of main production;
- subsystem of auxiliary production;
- subsystem of service production.

The structural diagram of the functioning of the vehicle maintenance and repair system in a motor transport enterprise is presented in Fig. 1.

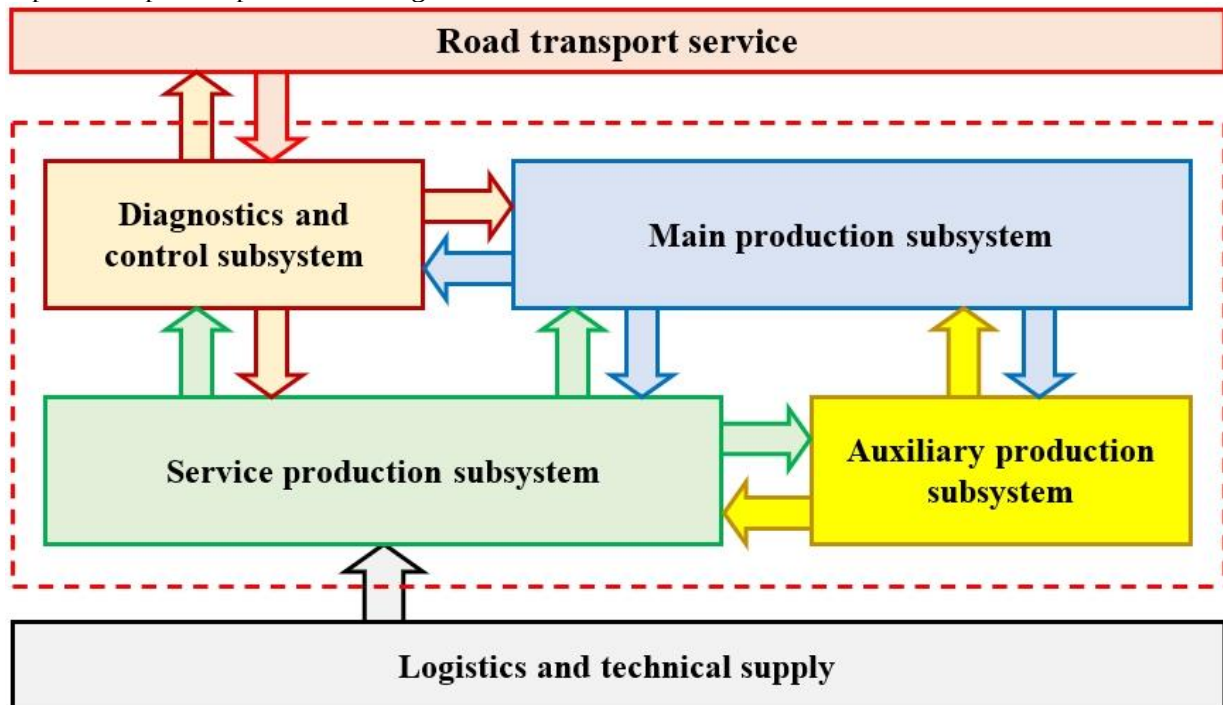


Fig. 1. Scheme of the functioning of the system of technical maintenance and current repair of vehicles in a motor transport enterprise [3–6]

The central place in the vehicle maintenance and repair system is occupied by the main production, as a subsystem that performs work directly on the vehicles and prepares them for entry into the production line in a technically sound condition.

Each of the specified subsystems of the main, auxiliary production and diagnostics can be put into optimal operating conditions, i.e. to ensure their maximum efficiency, according to certain technical and economic criteria. But when studying the entire system as a whole, these subsystems cannot be considered in isolation from each other, since achieving a single goal - ensuring the required level of performance of the automotive rolling stock at minimal costs - is possible only with their joint effective work. This is the principle of a systems approach in the study of complex technical systems, which includes the system of technical maintenance and current repair of vehicles in a motor transport enterprise.

The essence of the systems approach in studying maintenance and repair systems in a motor transport enterprise is to focus on the entire system as a whole, and not on its individual parts. When considering individual elements of the system, it is necessary to establish the impact of their work on the functioning of other elements and the entire system as a whole.

The study of complex systems consisting of various subsystems and elements, without violating their integrity, can be carried out through their analysis and synthesis. When analyzing individual subsystems, those properties that make them parts of a whole are identified, and when synthesizing, the whole is understood as consisting of parts that are somehow interconnected.

The goal of the maintenance and repair system - ensuring the required level of performance at minimal cost – can be achieved by creating optimal capacities of subsystems for joint work and increasing their efficiency through organizational and other measures.

Ensuring the required level of performance depends significantly on the incoming flow of requirements and the performance of the maintenance and repair system when performing a particular type of action. By requirement (application) we mean the need to perform a particular type of technical action. In this regard, to analyze the efficiency of the system, it is necessary to establish dependencies between the incoming flow of requirements and the performance of the system. These tasks are successfully solved using mathematical methods of the theory of queuing.

The main elements of a Queuing system are the incoming flow of requests (ΣN_i), service stations, a queue of requests awaiting service, and an outgoing flow of requests ($\Sigma \mu_i, X_i$). Service refers to the satisfaction of a request (application) for a technical action.

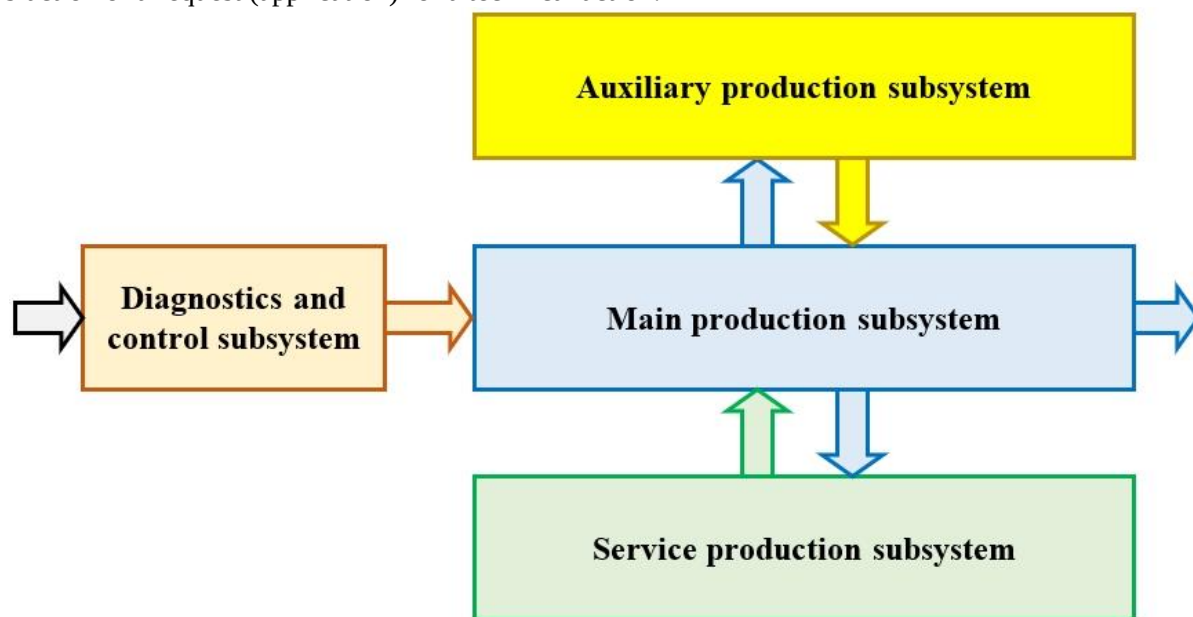


Fig. 2. Block diagram of a queueing system

Since the purpose of the service system as a whole is to satisfy the requirements for performing certain works, the most important concept of the Mass Service System is the system performance and the incoming flow of requirements entering the system of technical maintenance and current repair of automobiles.

In the event that the number of incoming requirements exceeds the throughput capacity in the mass service system, a queue of requirements for performing technical actions appears. The queue can be formed in front of each subsystem separately, therefore, each of the subsystems can block the operation of the entire system. To avoid this, it is necessary to select one of the most appropriate subsystems as a blocking one, ensure its sufficient throughput capacity and coordinate the throughput capacities of other subsystems in relation to the blocking one (Fig. 2).

Incoming flow of requirements – requirements entering the system. As studies of the operational reliability of cars show, random flows of requirements enter the system and its subsystems, which are formed through random runs at random points in time and require work of random complexity to perform technical actions.

Outgoing flow of requirements – requirements leaving the system. When requirements sequentially pass through different subsystems (phases), the flow of requirements leaving one subsystem can be input for another. The system of technical maintenance and repair of cars in a motor transport enterprise is considered as a lossless system (a requirement does not leave the system unserved) with a limited number of service devices when a relatively unlimited number of requirements arrive.

A random flow of requests for technical actions entering the system of technical maintenance and current repair of automobiles is defined in Queueing theory as simple. A characteristic of a simple flow of requests is the probability of occurrence of K requests during time $t(P_K(t))$, which is described by Poisson's law [7–16]:

$$P_K(L) = \frac{(\lambda t)^K}{K!} e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

where: λ – demand flow density (average number of demands entering the system per unit of time).

The duration of technical actions affects the amount of system throughput along with the incoming flow of requests. The duration of maintenance of this car is a random variable, depending on numerous factors, such as the maintainability of the car, operating conditions, mileage since the beginning of the car's operation, the availability of spare parts, the qualifications of drivers and repair workers, the degree of mechanization of production processes, labor organization, etc.

When studying the system, it is necessary to take into account the influence of individual subsystems on the operation of the entire system. For example, the duration of a car's stay in the system, in addition to the duration of technical actions in the main production t_i , also significantly depends on the waiting time for the start of actions T_{EX} , the time for cleaning and washing works T_{DM} , the time for diagnosing T_D and the amount of unproductive time losses T_l (simple due to untimely provision of workplaces with spare parts, tools, equipment, etc.). Then the total duration T of a car's stay in the system of technical maintenance and current repairs when performing technical actions can be written in the following form:

$$T = T_E + T_{DM} + T_D + T_l \quad (2)$$

Thus, the time a car stays in the maintenance and repair system, which characterizes its throughput, depends on the operation of individual subsystems: diagnostics, main, auxiliary and service production. The system can successfully cope with the tasks assigned to it only if the system throughput ΣW_i exceeds the total input flow of requirements ΣN_{ci} for all types of actions [7–16]:

$$\sum_{i=1}^n N_{ci} \leq \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \mu_i X_i, \quad (3)$$

where: X_i – conditional capacity (number of posts) at the i -th action;

μ_i – average productivity of the post at the i -th action.

A slight excess of the system's post capacity over the incoming demand flow may not have the desired effect, and an excessive increase in posts is associated with high costs for creating additional production capacities. Therefore, it is necessary to establish the most profitable (optimal) reserve value η of production capacities:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i X_i - \sum_{i=1}^n N_{ci} = \eta \rightarrow \text{opt} \quad (4)$$

The optimal value of the system's production capacity reserve can be found by the economic criterion (ensuring minimum costs C or maximum specific profit P_{sc}):

$$\sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min; \sum_{i=1}^n P_{sc} \rightarrow \max \quad (5)$$

The mathematical model of the vehicle maintenance and repair system must ensure that the following conditions are met:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n N_{ci} \leq \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \mu_i X_i; \sum_{i=1}^n \mu_i X_i - \sum_{i=1}^n N_{ci} = \eta \rightarrow \text{opt}; \\ \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min; \sum_{i=1}^n P_{sci} \rightarrow \max \left(\sum_{i=1}^n P_{sci} \geq P_{sci}^0 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

The application of this model is reduced to determining the total costs of vehicle maintenance and repair and their minimization (C_i) taking into account the specific cost of vehicles (C_A). The minimum costs correspond to the optimal mileage of effective vehicle operation (L_{opt}). In this case, the costs of vehicle maintenance are equal to:

$$C_{CM} = SC_{CM} \cdot LI_{CM}, \quad (7)$$

where: SC_{CM} – питомі витрати на виконання операцій ТО;

LI_{CM} – labor intensity of maintenance work at the corresponding mileage of the car.

The costs of current repairs are equal to:

$$C_{CAR} = SC_{CAR} \cdot LI_{CAR}, \quad (8)$$

where: SC_{CAR} – specific costs for current repairs;

LI_{CAR} – labor intensity of current car repairs based on the mileage. The total costs are determined as follows:

$$C = C_{CM} + C_{CAR} \quad (9)$$

With increasing mileage, the costs of maintenance and current repairs increase (reduction in the resource of parts or units and increase in repair costs), and the specific cost of cars decreases. The expression $C = C_{CM-CAR} + C_A$ is an objective function, the extreme values of which correspond to the optimal solution. In this case, the optimal solution (L_{opt}) corresponds to the permissible cost value (Fig. 3). The determination of the value of the objective function of the optimal value is determined graphically or analytically if the dependencies $C_{CM} = f(l)$ and $C_{CAR} = \psi(l)$ are known.

Analysis of the operation of the maintenance and repair system using an analytical mathematical model is carried out on the basis of certain statistical information about random phenomena occurring in it and processes that can also be obtained by the method of statistical modeling.

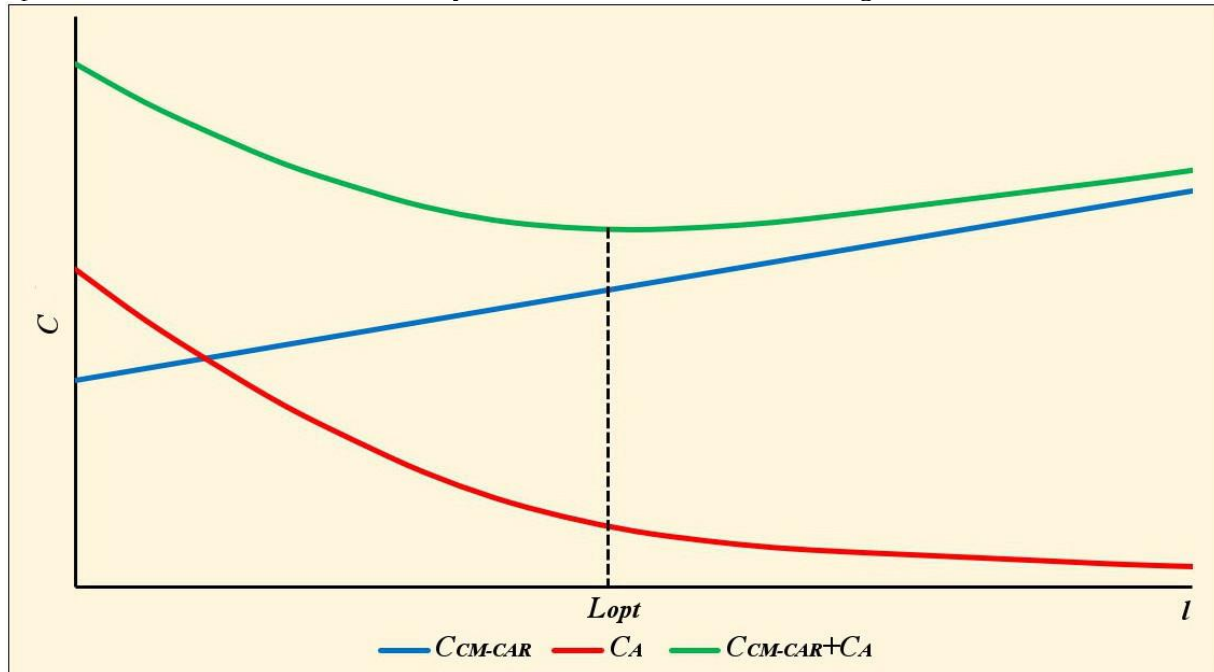


Fig. 3. Determining the value of the vehicle's effective operating mileage

The general structure of the production and technical base of a motor transport enterprise must be considered as a set of interconnected complexes (Fig. 4).

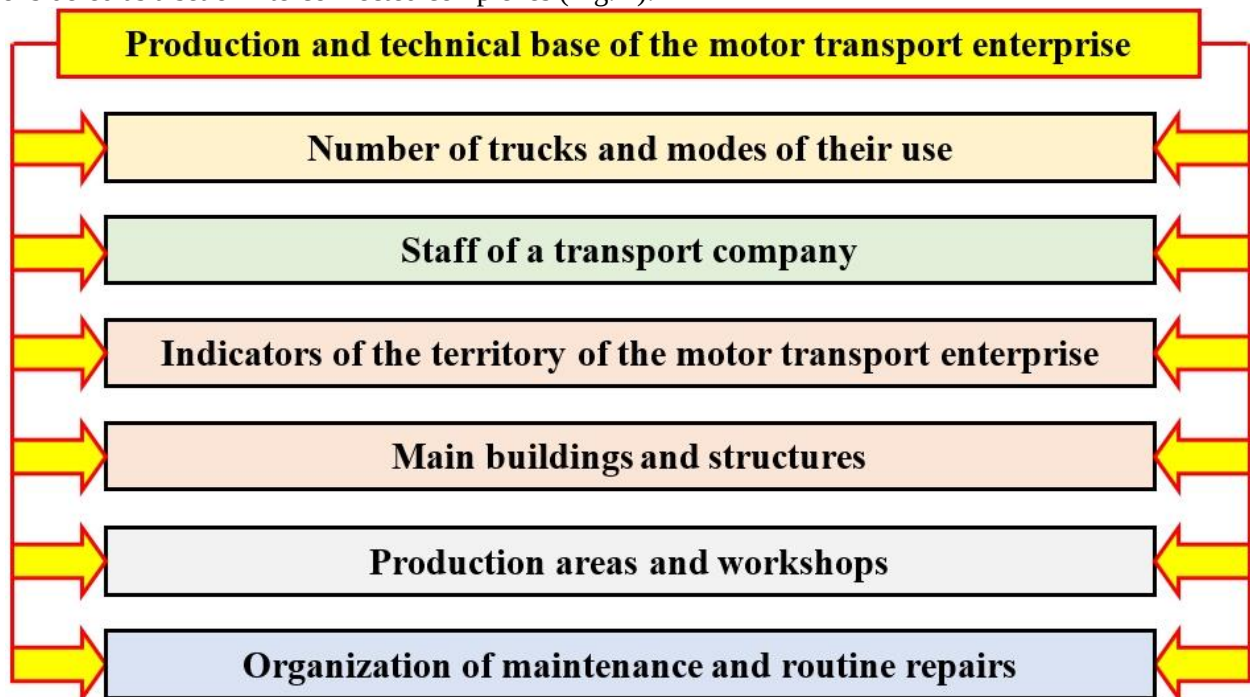


Fig. 4. General structure of the production and technical base of a motor transport enterprise

Since the study is carried out at a specific motor transport enterprise, then the influence of individual complexes can be neglected, in particular, such as: indicators of the territory, main buildings and structures, production areas, and enterprise staff. To develop a methodology for calculating the production program for maintenance and current repair of automobile rolling stock, it is necessary to first consider the following set of interrelated factors: maintenance and repair system; fleet size; operating modes of rolling stock; age of rolling stock; performance indicators of maintenance and repair services; regulatory framework used; operating conditions of automobile rolling stock.

The solution to the problem of improving the methodology for calculating the production program for technical maintenance and current repairs and its adaptation to the real conditions prevailing in motor transport enterprises that use foreign-made automotive rolling stock will be solved:

- by changing the value of the calculation cycle at the stage of commissioning of automotive rolling stock with high resource mileage (a complex of technical maintenance works), having reached the planned capacity of the motor transport enterprise – the mileage of effective operation of vehicles;
- determining the natural impact of changes on the values of the performance indicators of the production and technical base (the coefficient of technical readiness of vehicles, annual volumes of work in terms of the number and complexity of technical maintenance and current repair actions);
- determining the value of the mileage of effective operation for the studied automotive rolling stock;
- using the results of determining the production program for technical maintenance and current repairs to determine the number of daily maintenance, technical maintenance and current repair posts.

Therefore, as an object of research in developing a methodology for determining a production program for technical maintenance and current repairs for automotive enterprises that use foreign-made automotive rolling stock, the following objective function was defined:

$$C, L_{opt}(t) \rightarrow \text{opt} \quad (10)$$

The calculation cycle is understood as a certain mileage of a car, during which a strictly certain number of technical actions are performed with a clear work schedule, which is periodically repeated throughout the entire service life. Currently, according to the «Regulations on technical maintenance and repair of rolling stock of road transport» [1], the calculation cycle is taken as the mileage of a car before major repairs or before write-off.

To determine the production program for maintenance and repair of vehicles with high resource mileage, the calculation cycle at the stage of commissioning new rolling stock is taken as the mileage for a regularly recurring complex of «service» maintenance (L_C).

For example, for the IVECO Stralis 2013 model (EURO VI standard), the following types of maintenance are provided, which are performed after $L_C = 150,000$ km of mileage [17]:

M (Maintenance) – standard operations carried out at regular intervals, multiples of each other, expressed in kilometers of vehicle mileage;

EP (Extra Plan) – unscheduled operations (additional to standard maintenance), carried out at intervals that do not coincide with standard maintenance intervals;

T (Time) – one-time special operations associated exclusively with time intervals, and, as a rule, carried out at certain times of the year.

In Mercedes Actros vehicles, the Telligent® maintenance control system allows, depending on the intensity of use of the truck, to form service intervals of up to 120,000 km and oil change intervals of up to 150,000 km. The system monitors the actual load on the Actros, thanks to which the potential of all operating materials can be fully utilized [18].

Maintenance intervals for the Volvo FM vary depending on operating conditions and specific vehicle components. As a rule, the standard interval for most operations is 90,000 km or one year, but in difficult operating conditions it can be reduced to 45,000 km or 400 hours. The corresponding frequency recommendations are given in the operating manual [40].

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

Improving the calculation of the production program for maintenance and current repair of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise includes the objective function of minimizing the total costs for the calculation cycles for specific car brands. For Mercedes Actros trucks, the calculation cycle of routine maintenance is fully controlled by the Telligent® system, other car manufacturers indicate the periodicity of routine maintenance in the manuals for a specific car brand. To optimize the production and technical base of a motor transport enterprise, it is advisable to apply the theory of mass service of formulas (3, 4) using the economic criterion (formulas 5, 6).

CONCLUSIONS

The successful activity of a motor transport enterprise consists in minimizing the costs of organizing transportation and ensuring the operability of the automobile rolling stock (the system of technical maintenance and current repair of automobiles). Minimization of the costs of technical maintenance and current repair of automobiles is achieved when performing all routine work through calculation cycles, which depend on the periodicity of execution recommended by automobile manufacturers, their optimal values are determined on the basis of statistical data on the operation of automobiles in real conditions. The production program for technical maintenance and current repair of automobile rolling stock in the conditions of a motor transport enterprise will include the volume of all routine work, as will be performed through calculation cycles of automobile mileage.

LITERATURE

1. On approval of the Regulations on technical maintenance and repair of road vehicles of road transport. March 30, 1998 No. 102. Database «Legislation of Ukraine». Source of electronic access: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
2. Chabannyi, V. YA; Osypov, I. M. Trends in the development of the production and technical base of road transport. Collection of scientific papers of Kirovograd National Technical University. Techniques in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation. 2011. Issue 24(2). P. 82–90.
3. Ludchenko, O.A. Technical operation and maintenance of vehicles: Organization, planning and management. Kyiv. Logos. 2014. 464 p.
4. Dembitskyi, V.M.; Pavliuk, V.I.; Prydiuk V.M. Technical maintenance of cars. Lutsk. 2018. 473 p.
5. Fornalchyk, YE. YU; Olishevych M. S.; Mastykash, O. L.; Pelo, R. A. Technical operation and reliability of cars. Lviv. Afisha. 2004. 492 p.
6. Zakharchuk, O. V. Maintenance and repair of motor vehicles. Lutsk. 2015. 140 p.
7. Dubinenko, S. B.; Mitiushkin, YU. I. Operations research. Part 1. Queuing systems. Vinnytsia. 2008. 55 p.
8. Holoskokov, O. YE; Holoskokova, A. O.; Moshko YE. O. Fundamentals of the theory of exponential queuing systems. Kharkiv. 2017. 312 p.
9. Zhernovyi, YU. V. Simulation modeling of Queuing systems. Lviv. 2007. 307 p.
10. Tolubko, V. B. Simulation modeling of Queuing systems. Kyiv. 2018. 175 p.
11. Lytvynov, A.L. Theory of queuing systems. Kharkiv. 2018. 141 p.
12. Lozhkovskyi, A. G. Theory of queuing systems in telecommunications. Odesa. 2010. 112 p.
13. Pavlenko, P.M. Fundamentals of mathematical modeling of systems and processes. Kyiv. 2013. 201 p.
14. Savchuk, O.V.; Morhal, O.M. Process and systems modeling. Kyiv. 2012. 2012 p.
15. Samoilenko, M.I; Skokov B. G. Operations Research (Mathematical Programming. Queuing Theory). Kharkiv. 2005. 176 p.
16. Tomashevskyi, V.M. Systems modeling. Kyiv. 2005. 362 p.
17. Maintenance schedule for Iveco vehicles. Source of electronic access: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
18. Mercedes-Benz. Actros. Axor. Brochure. 2008. 42 p.
19. Technical information Volvo FM400. Source of electronic access: <https://www.autoklad.ua/ua/techinfo/10841/>

Хаврук В. О. Методологічний підхід до розробки робочої гіпотези удосконалення розрахунку виробничої програми з технічного обслуговування та поточного ремонту автомобільного рухомого складу в умовах автотранспортного підприємства

У статті розглядається методологічний підхід вдосконалення розрахунку виробничої програми з технічного обслуговування та поточного ремонту автомобільного рухомого складу в умовах автотранспортного підприємства. Зважаючи на різномарочність сучасних автомобілів в автотранспортних підприємствах, пропонується для визначення обсягів сервісних робіт використовувати цикловий метод розрахунку виробничої програми, який передбачає визначення оптимального розрахункового циклу виконання регламентних сервісних робіт для конкретних марок автомобілів.

Автотранспортне підприємство представлене складною структурою, яка включає такі підсистеми, як: діагностування і контролю; основного виробництва; допоміжного виробництва; обслуговуючого виробництва. Серед яких центральне місце в системі технічного обслуговування і

поточного ремонту автомобілів займає основне виробництво, як підсистема, що виконує сервісні регламентні роботи і підтримує автомобілі в технічно справному стані.

Встановлено, що метою системи технічного обслуговування і поточного ремонту є забезпечення необхідного рівня працездатності при мінімальних витратах, яка може бути досягнута створенням оптимальних потужностей підсистем для спільної роботи і підвищенням їх ефективності організаційними і іншими заходами.

З'ясовано, що для забезпечення необхідного рівня працездатності автомобілів необхідно виконати розрахунки пропускнуї спроможності підсистеми основного виробництва автотранспортного підприємства за допомогою математичних методів теорії масового обслуговування.

Для оцінки величини пропускнуї спроможності системи разом з вхідним потоком вимог запропоновано визначати тривалість технічних дій в основному виробництві.

В статті наведена математична модель системи технічного обслуговування і поточного ремонту автомобілів на основі економічного критерію – забезпечення мінімуму витрат або максимуму питомого прибутку.

Методологічний підхід до розробки робочої гіпотези представлений у вигляді цільової функції мінімізації сумарних витрат на технічні обслуговування і поточні ремонти автомобільного рухомого складу, які виконуються через оптимальні розрахункові пробіги – відкоректовані, рекомендовані автовиробниками, міжсервісні пробіги.

Метою статті є з'ясування показників, за якими в подальшому можливо удосконалити розрахунок виробничої програми з технічного обслуговування та поточного ремонту автомобільного рухомого складу в умовах автотранспортного підприємства.

Ключові слова: автомобільний рухомий склад, виробничо-технічна база, поточний ремонт, розрахунковий цикл, система масового обслуговування, технічне обслуговування, трудомісткість.

ХАВРУК Володимир Олександрович, асистент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Національний транспортний університет, e-mail: khavruk@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-4686-4109>.

Volodymyr KHAVRUK, Assistant of Motor Vehicle Maintenance and Service Department, Kyiv National Transport University, e-mail: khavruk@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-4686-4109>.

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

<https://doi.org/10.36910/r1zg7d50>

A. I. Korobko, I. V. Semenov
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

A MODEL FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF A TRANSPORT SYSTEM BASED ON THE RISK OF FUNCTIONAL STABILITY

The objective of this study is to enhance the efficiency of transport systems by refining their evaluation model through a risk-oriented approach. To achieve this objective, the following tasks were addressed: identifying the primary factors influencing the functional stability of vehicles within transport systems, and substantiating a model for evaluating the operational efficiency of transport systems based on vehicle functional stability and a risk-oriented approach. Functional stability is a complex, multifactorial characteristic that defines the ability of rolling stock to perform its transport function reliably, safely, and efficiently under real-world operating conditions. This level is determined by the interplay between a vehicle's inherent technical properties and a wide range of external factors related to the transport system, infrastructure, environment, logistics, and management. This approach allows functional stability to be viewed not as a passive property of a vehicle, but as a manageable foundation for the operational efficiency of transport systems. The proposed model for evaluating transport system efficiency demonstrates that: the efficiency of its operation is proportional to the functional stability of its constituent vehicles, which, in turn, declines exponentially; the rate of this decline is determined by the risk of external factors impacting the vehicle: the higher the risk, the more rapidly functional stability diminishes; and the model accounts for the cumulative effect of external factors over time.

Keywords: transport system, transport, systems approach, operational stability, external factor, risk, efficiency.

INTRODUCTION

The current stage of development in the transport industry is characterized by a significant increase in the complexity of vehicle design, growing intensity of traffic flows, expansion of operating conditions, and heightened requirements for the safety, reliability, and operational efficiency of transport systems. Under these conditions, ensuring the functional stability of vehicles-defined as the ability to maintain specified operational, technical, and safety characteristics over a given period and under varying environmental conditions has become particularly urgent.

The operation of a vehicle within a transport system is a complex, multifactorial process simultaneously influenced by design parameters, technical condition, traffic modes, road and climatic conditions, the level of information support, as well as the actions of the operator or driver. A decline in any of a vehicle's functional circuits-namely traction-dynamic, braking, handling, stability, power, information, or ergonomic-below regulatory standards may lead to reduced transportation efficiency, increased operating costs, compromised traffic safety, and the destabilization of the entire transport system.

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND FORMULATION OF THE PROBLEM

The efficiency of a transport system is largely determined by the ability of its technical components to ensure the consistent performance of specified functions under varying operating conditions. Among these components, the vehicle plays a key role, as it is the vehicle that directly carries out the transport process and determines the level of its productivity, safety, reliability and resource efficiency.

An analysis of the literature [1-10] shows that in contemporary scientific literature, the efficiency of transport systems and freight transport is considered a multi-criteria category, assessed not by a single indicator but through several groups of factors and indicators. In particular, works [1-3] focus on service-economic and operational indicators: timeliness of delivery, reliability of transport services, cost of transport, productivity, level of resource utilisation, quality of logistics services, as well as environmental and social impacts. This approach demonstrates that the efficiency of the transport process is shaped not only by direct costs and outcomes, but also by broader characteristics of the transport system's functioning.

Another group of studies [4-7] examines efficiency at the level of methodology, evaluation models, and organisational and managerial factors. These analyses focus on approaches to measuring the efficiency of transport systems, the sustainability of urban logistics, barriers to the transformation of transport processes, and the potential for using big data to describe and forecast the behaviour of freight flows. These studies confirm that, in practical assessment, structural-organisational, information-analytical, infrastructural and managerial factors are typically identified as determining the effectiveness of transport operations.

A separate line of research [8-10] focuses on the spatial-network and transport-technological aspects of efficiency. The authors of these studies link efficiency to changes in freight flows, the location of loading and unloading zones, the dynamics of freight transport movement, the interaction of transport network

participants, and the optimisation of decisions solely at the level of urban logistics. Thus, the literature provides a fairly comprehensive account of the external conditions governing the transport process: route organisation, infrastructure constraints, demand distribution, transport policy, digitalisation, and the interaction of elements within the logistics network.

However, despite the breadth of coverage, most of the works considered share one significant limitation: the object of assessment is predominantly the transport system, the transport process or the logistics network, but not the transport vehicle itself, in particular the motor vehicle (MV), as the functional carrier of transport. Even when reliability, stability or transport performance are mentioned, these characteristics are usually interpreted solely at the level of service, operations, flows or organisational decisions, rather than at the level of the technical condition, operational capability and functional stability of a specific motor vehicle.

To further highlight the relevance of considering the functional stability of vehicles as a factor that significantly influences the functioning of transport systems, it is advisable to examine scientific works in research areas where the efficiency of transport operations is linked not only to the organisation of the process itself but also to the influence of the environmental conditions in which this process takes place. Among such works, [11-15] can be highlighted. These publications broaden the scope of analysis by taking into account environmental, infrastructural, climatic, and logistical conditions.

In a number of studies, the efficiency of transport operations is examined through the parameters of the transport process and the logistical organisation of delivery. Thus, in [11], the efficiency of the supply chain is analysed depending on the parameters of the transport process: the duration of operations, the coordination of movement stages, the regularity of transport services, the distribution of time costs, and logistical coordination. The authors effectively demonstrate that even with an identical delivery structure, changes in transport and service parameters can significantly alter the overall performance of the entire system. A similar line of reasoning is demonstrated in [12], where the impact of logistics management practices on the operational performance of road transport companies is linked to the quality of route management, the organisation of interaction, resource planning and the management of transport operations. These studies clearly demonstrate an understanding that transport efficiency is a function of the external organisation of the process – its planning, coordination, and manageability.

The vast majority of authors emphasise the need for sustainable development of transport systems in their work. They examine efficiency through the prism of environmental sustainability, resource efficiency, economic sustainability and systemic balance. For instance, Stephen Nkesah [13] conducted a systematic review of the sustainability of road freight transport and concluded that modern approaches to improving the efficiency of road freight include reducing emissions, optimising routes, increasing energy efficiency, reducing empty runs, digitalisation, fostering cooperation and changing transport policy. A similar multidimensionality of assessment is demonstrated in [14], where sustainability is evaluated through the impact of lorry routing strategies on economic, environmental and operational indicators, as well as in [15], in which multimodal transport is considered as a means of ensuring sustainable development.

The analysis of the literature shows that existing approaches to studying the operational efficiency of transport systems do not sufficiently account for the impact of a vehicle's internal condition on the overall efficiency of the transport process. Nevertheless, it is precisely the technical condition of components and systems, the reliability of units, remaining service life, the stability of adjustable parameters, failure probability, and the ability to maintain operational properties under various operating modes and conditions that directly determine whether a motor vehicle can ensure the necessary productivity, regularity, safety and cost-effectiveness of transport. In other words, the efficiency of the transport system is most often assessed in the literature as a function of the external organisation of transport, but not as the result of the combined effect of external conditions and the internal functional stability of the vehicle.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of the study is to improve the efficiency of transport systems by refining the model for their assessment based on a risk-oriented approach. To achieve this objective, the following tasks must be addressed:

- to identify the main factors influencing the operational stability of vehicles within the context of transport system operations;
- to develop a model for assessing the operational efficiency of transport systems based on the operational stability of vehicles and utilising a risk-oriented approach.

RESEARCH RESULTS

Factors influencing the operation of transport systems from the perspective of a vehicle's functional stability

A systems analysis [16] shows that most factors traditionally regarded as determinants of transport system efficiency are, in fact, realised through changes in the level of a vehicle's functional stability. This means that there is an intermediate systemic link between the external and internal operating conditions of the transport system and its output indicators – the functional stability of the vehicle (Fig. 1).



Fig. 1 – A prerequisite for the effective functioning of the transport system

This approach allows us to formulate a cause-and-effect model: the efficiency of the transport system is not viewed as a direct consequence of the availability of equipment, routes, etc., but is determined by the extent to which a vehicle is capable of performing its transport function consistently within a specific operating environment.

Let us identify the main groups of factors influencing the functioning of the transport system through the functional stability of the vehicle, since it is precisely through the condition and behaviour of the rolling stock that the key characteristics of the transport process are realised. These factors include technical, loading and operational, road and infrastructure, natural and climatic, organisational and logistical, human, and information and management factors (Fig. 2).

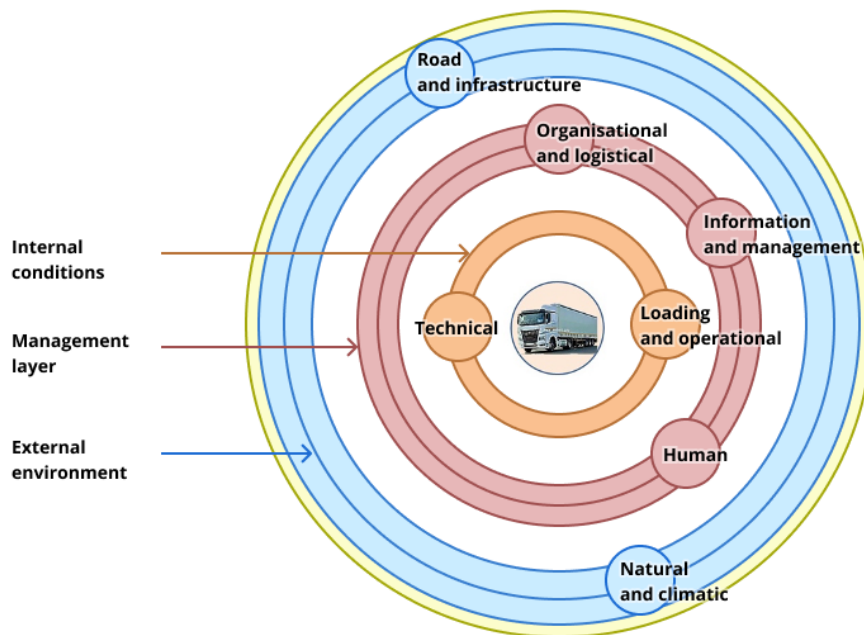


Fig. 2 – Factors affecting the functioning of the transport system through the functional stability of the vehicle

The primary basis for a vehicle's operational reliability is its technical condition, which determines its potential ability to perform its transport function consistently throughout its entire service life. Technical factors include the serviceability of assemblies and systems, their level of wear, the remaining service life of components, the reliability of the engine, transmission, braking system and chassis, the stability of settings, the presence of hidden defects, resistance to failure, and maintainability. Taken together, the influence of these factors manifests itself in the vehicle's ability to maintain a given level of performance and technical readiness over time.

As the technical condition deteriorates, systemic consequences arise, manifested in an increased probability of failures, a reduction in the technical readiness coefficient, an increase in the number of unscheduled downtimes, disruption to the regularity of journeys, increased operating costs, and a reduction in the actual productivity of the transport unit. These changes directly affect the efficiency of the entire transport system.

In view of the above, it can be stated that the technical condition of a vehicle effectively sets the upper limit of the transport system's potential efficiency. Even with a high level of transport organisation and favourable road and infrastructure conditions, it is impossible to ensure the stable operation of the system if vehicles are in a state of «accelerated deterioration». In this regard, technical factors should be regarded as the fundamental framework for establishing the functional stability of a vehicle, which ultimately determines the stability and efficiency of the transport system as a whole.

Loading and operational factors constitute a group of factors that determine the operating modes and intensity of a vehicle's use, since it is the operational load that dictates the conditions under which its design potential is realised and the rate at which 'functional degradation' accumulates. These factors include the vehicle's load factor, the presence and magnitude of overloads, the number of trips per shift, the average trip duration, the driving mode, the frequency of acceleration and braking, the duration of operation under load, the number of engine start-stop cycles, and the proportion of operation under severe conditions. In the context of functional stability, these parameters characterise the operational stress on the vehicle: as the intensity of operation increases, the mechanical, thermal and dynamic loads on its components and systems rise, leading to accelerated wear and an increased likelihood of failures. For the transport system as a whole, this means that operating modes affect both current productivity and the long-term sustainability of the transport process. Thus, a short-term increase in load or transport intensity may lead to an increase in the volume of transport work performed, but at the same time contributes to an accelerated decline in the functional stability of the vehicle and, consequently, a deterioration in the efficiency of the system during subsequent operating cycles. In this regard, the assessment of the transport system should be based not only on indicators of current productivity, but also take into account the cost at which this result is achieved in terms of maintaining the functional stability of the rolling stock.

Road infrastructure factors are the most important component of the operating conditions of the transport system, as the transport process always takes place within a specific infrastructure environment. Parameters such as road surface quality, the presence of unevenness, rutting and potholes, the type of road surface, the route's topography, longitudinal and transverse gradients, the geometry of bends, the condition of access roads, the capacity of individual sections, as well as the presence of traffic jams, junctions and various restrictions. The influence of these factors manifests itself through changes in rolling resistance, levels of vibration and shock loads, tyre-road contact conditions, actual speed and the frequency of manoeuvres.

The impact of road and infrastructure conditions is reflected in journey times and the reliability of a vehicle's operational condition. Deterioration in road conditions leads to increased dynamic loading on structural components, accelerated wear of the running gear and suspension, increased fuel consumption, reduced driving stability, a higher probability of technical failures, and an increase in the variation of the time parameters of the transport cycle. Thus, road and infrastructure factors should be regarded as active influences that alter the level of a vehicle's functional stability during its operation.

Natural and climatic factors significantly influence the functioning of the transport system, forming an external disturbance field that affects the vehicle during its operation. Such factors include ambient temperature, humidity, precipitation, the presence of snow, ice, mud and dust, seasonal changes in road surface conditions, wind loads, and the corrosive activity of the environment. In terms of a vehicle's operational stability, these influences manifest themselves in the performance of cooling and lubrication systems, tyre characteristics and road grip conditions, the operation of hydraulic and electrical systems, and through increased corrosion and abrasive wear.

For the transport system as a whole, this means that even with identical vehicle design characteristics and unchanging transport routes, operational efficiency can vary significantly depending on seasonal and weather conditions. This is because vehicles maintain their functional stability differently as environmental parameters change. Thus, natural and climatic factors should be regarded as important modifiers of the transport system's stability, which exert an indirect influence through changes in the functional state of the vehicle and its ability to maintain specified operational parameters under various operating conditions.

Organisational and logistical factors are reflected in the principles and methods used to organise the transport process. They determine the actual structure of loads, waiting times, the sequence of operations and

the modes of vehicle utilisation. This group of factors includes the routing scheme, the coordination of timetables, the regularity of transport supply, the organisation of loading and unloading operations, the occurrence of waiting times and downtime, the duration of the turnaround cycle, the availability of reserve rolling stock, the flexibility of the dispatching system, and the level of coordination between participants in the transport process. Despite the indirect nature of their impact, these factors significantly affect the operational stability of the vehicle. For instance, prolonged idling with the engine running leads to increased wear and fuel consumption; an uneven flow of traffic leads to congestion during peak periods; the lack of reserve capacity forces vehicles to operate at the limits of their capacity; and inefficient routing increases empty runs and the overall operational load. Ultimately, the organisational and logistical structure of the transport system determines not only its immediate efficiency but also the nature of transport operating modes, and thus influences the level of their functional stability and the overall stability of the system's operation.

The human factor is the most important element in ensuring the functional stability of a vehicle, as it is the driver who operates the vehicle, monitors its technical condition and makes key decisions during operation. This group includes driver qualifications, driving style, adherence to established operating procedures, the accuracy of transport operations, the timeliness of identifying signs of malfunctions, the discipline of technical inspections, the level of training of maintenance staff, and the quality of dispatch decisions. The influence of the human factor is evident in the vehicle's current operational behaviour and in the rate at which its «functional degradation» accumulates. For example, an aggressive driving style contributes to accelerated wear of the braking system, transmission and tyres; an irrational choice of driving modes increases fuel consumption and the thermal load on the engine; and ignoring early signs of malfunctions leads to latent defects developing into overt failures. Thus, the human factor should be regarded as an active regulator of a vehicle's functional stability, upon which the stability of the transport system as a whole depends.

At the current stage of transport system development, information and management factors are playing an increasingly important role, as they enable the monitoring and regulation of operational processes based on data and analytics. This group includes the availability of on-board diagnostics, technical condition monitoring systems, route and operating mode control, recording of failures and deviations, the use of telemetry, digital fleet management, remaining life prediction and adaptive dispatch control. The significance of these factors stems from the fact that a vehicle's operational stability is determined not only by its initial technical condition, but also by the system's ability to detect deviations in a timely manner and adjust operating conditions.

In the absence of advanced information support, a deterioration in a vehicle's condition leads to a loss of efficiency and increased downtime. At the same time, the use of monitoring, diagnostic and telemetry systems make it possible to detect the onset of deterioration at an early stage, predict the development of failures and take preventive management decisions. Thus, information and management factors ensure control and active support for the functional stability of the vehicle.

A model for assessing the performance of a transport system based on the functional stability of vehicles and using a risk-based approach.

The efficiency of a transport system is determined by its ability to ensure the continuous, safe, timely and cost-effective execution of the transport process in a changing environment. In the field of freight transport, such efficiency is shaped by a large number of interrelated factors. The technical and operational capabilities of the vehicles directly involved in the freight delivery process play a leading role among these factors. This is why the overall performance of the transport system depends to a large extent on the extent to which a vehicle is capable of consistently maintaining the necessary properties and performance indicators under the influence of variable external and internal factors.

Let us consider the transport system as a dynamic system, the operation of which is characterised by the level of functional stability $S(t)$, where $S(t) \in [0,1]$, and:

- $S(t)=1$ – fully stable operation;
- $S(t)=0$ – complete loss of operational capability.

The efficiency of the transport system's operation $E(t)$ is linked to functional stability. This is evident in the fact that any disruptions (malfunctions, delays, failures) reduce productivity. Therefore:

$$E(t) = E_{\max} S(t). \quad (1)$$

where $E_{\max}$ is the maximum (nominal) efficiency of the system under ideal conditions.

Suppose the system is affected by external factors (weather conditions, loads, technical failures, etc.). It is convenient to describe their impact not directly, but in terms of the risk of loss of functional stability.

The risk $R(t)$ is determined by the frequency of adverse events $\lambda(t)$ and the probability that an event will lead to a reduction in stability $p(t)$.

The risk can then be expressed as:

$$R(t) = \lambda(t)p(t). \quad (2)$$

External factors are heterogeneous and random in nature. To avoid describing each factor in detail, we introduce a generalised measure: risk. This is permissible because:

- the frequency $\lambda(t)$ reflects the intensity of the environmental impact;
- the probability $p(t)$ reflects the system's vulnerability.

Thus, expression (2) describes the expected intensity of the loss of functional stability, making risk a universal characteristic of the external environment's influence.

Let us assume that the rate of change in functional stability is proportional to the current level of stability and the risk of its loss:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -R(t)S(t), \quad (3)$$

or, taking (2) into account

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\lambda(t)p(t)S(t). \quad (4)$$

Equation (4) is a first-order equation with separate variables.

Let us divide both sides of equation (4) by $S(t)$ and multiply by $d(t)$

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = -\lambda(t)p(t)dt, \quad (5)$$

Let us integrate both sides of (5)

$$\int \frac{dS}{S} = \int -\lambda(t)p(t)dt. \quad (6)$$

The left-hand side of equation (6) is a standard integral

$$\int \frac{dS}{S} = \ln|S|, \quad (7)$$

so, we obtain

$$\ln S(t) = -\int \lambda(t)p(t)dt + C. \quad (8)$$

We omit the modulus, since $S(t) \geq 0$.

Let at time $t=0$

$$S(0) = S_0. \quad (9)$$

Substitute (9) into (8)

$$\ln S(0) = C. \quad (10)$$

We substitute the constant term (10) into (8)

$$\ln S(t) = -\int_0^t \lambda(\tau)p(\tau)d\tau + \ln S_0. \quad (11)$$

We take the logarithm of (11)

$$S(t) = e^{\left(\ln S_0 - \int_0^t \lambda(\tau) p(\tau) d\tau \right)}. \quad (12)$$

Taking into account the properties of the exponential, we obtain in final form

$$S(t) = S_0 e^{\left(- \int_0^t \lambda(\tau) p(\tau) d\tau \right)}. \quad (13)$$

If $\lambda(t) = \lambda$ and $p(t) = p$ are constants, then

$$\int_0^t \lambda p d\tau = \lambda p t, \quad (14)$$

and the solution simplifies to

$$S(t) = S_0 e^{-\lambda p t}. \quad (15)$$

Substituting expression (13) into (1) gives

$$E(t) = E_{\max} S_0 e^{\left(- \int_0^t \lambda(\tau) p(\tau) d\tau \right)}, \quad (16)$$

or, for constant parameters

$$E(t) = E_{\max} S_0 e^{-\lambda p t}. \quad (17)$$

DISCUSSION OF THE RESULTS OF THE STUDY

The functional stability of a vehicle is an integral property that characterises its ability to perform its transport function with a specified level of performance, whilst maintaining the necessary level of technical readiness throughout its entire service life. This manifests itself in the stability of traction, speed and braking characteristics, ensuring the predictability of the vehicle's behaviour under various road and operating conditions. An important component of functional stability is also ensuring operation without a critical reduction in safety levels, even under the influence of external and internal disruptive factors. Furthermore, the vehicle must be capable of adapting to varying loads, driving modes and operating conditions, whilst maintaining the reliability of its main assemblies and systems. A key aspect is limiting the probability of failures and minimising unscheduled downtime, which directly affects the efficiency of the transport process. Taken together, these properties ensure the maintenance of an acceptable level of energy and operational efficiency and determine the vehicle's ability to consistently fulfil its functional capabilities within the transport system.

From the perspective of the transport system, this means that the functional stability of a vehicle is an internal regulatory factor regarding the continuity of the transport process. The higher the level of this stability, the more predictable and controllable the operation of the transport system becomes. Conversely, a reduction in the functional stability of one or more vehicles leads to increased variability in operational parameters, disruption of timetables, reduced throughput capacity and a deterioration in the overall efficiency of the system.

Consequently, the transport system must be viewed as a system in which macro-level performance indicators are determined by the micro-level capacity of transport vehicles to carry out transport operations (Fig. 3).

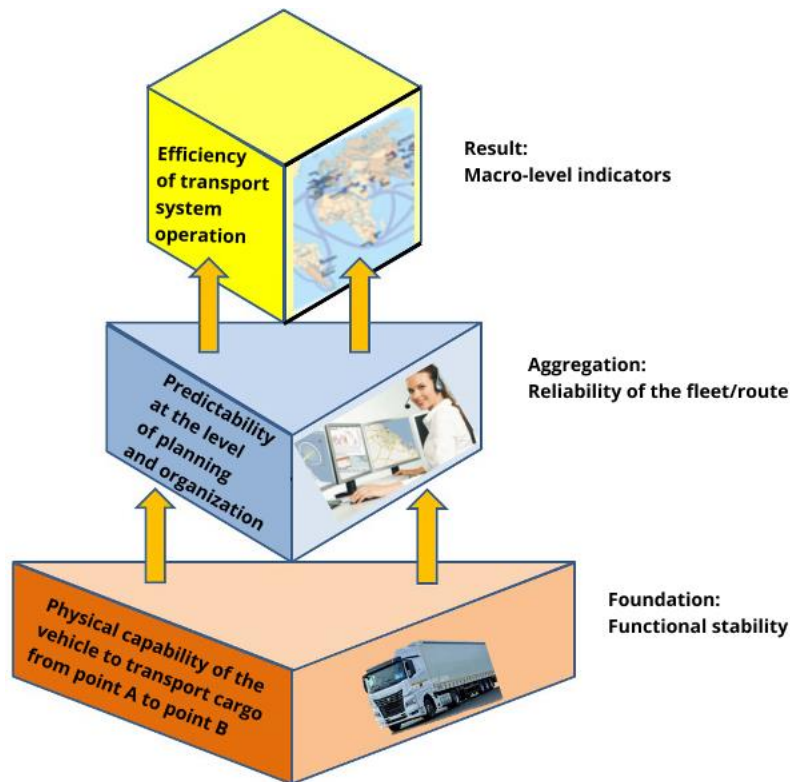


Fig. 3 – The relationship between the macro-level of the Customs Union and the macro-level indicators of the Customs Union's functioning

CONCLUSIONS

The operational reliability of vehicles is a complex, multifactorial characteristic that determines the ability of rolling stock to perform its transport function reliably, safely and efficiently under real-world operating conditions. Its level is shaped by the vehicle's internal technical properties and a wide range of external factors related to the transport system, infrastructure, environment, transport organisation and management. This approach allows functional stability to be viewed not as a passive property of a vehicle, but as a controllable basis for the effective functioning of transport systems.

The proposed model for assessing the efficiency of a transport system shows that:

- the efficiency of its operation is proportional to the functional stability of the vehicles comprising it, which, in turn, decreases (diminishes) according to an exponential relationship;
- the rate of decline is determined by the risk of external factors affecting the vehicle: the greater the risk, the faster the functional stability decreases;
- the model takes into account the cumulative effect of external factors over time.

REFERENCES

- [1] Blanquart Corinne & Burmeister Antje. (2009). Evaluating the performance of freight transport: A service approach. *European Transport Research Review*. 1. 135-145. [10.1007/s12544-009-0014-5](https://doi.org/10.1007/s12544-009-0014-5).
- [2] Krishna Kumar Dadsena, Sarmah S.P., Naikan V.N.A., Mathiyazhagan K., Vasco Sanchez Rodrigues. (2023). Performance measurement of road freight transportation: A case of trucking industry. *Transport Policy*. Volume 137, Pages 125-140, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.04.015>.
- [3] Paula Morella, María Pilar Lambán, Jesús Royo, Juan Carlos Sánchez. (2022). Evaluating the impact of new trends in urban freight transportation attending the triple bottom line: A case study. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 174. 108756, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108756>.
- [4] Victorino T., & Peña C. R. (2023). The Development of Efficiency Analysis in Transportation Systems: A Bibliometric and Systematic Review. *Sustainability*, 15(13), 10300. <https://doi.org/10.3390/su151310300>
- [5] Kaszubowski D. (2019). A Method for the Evaluation of Urban Freight Transport Models as a Tool for Improving the Delivery of Sustainable Urban Transport Policy. *Sustainability*, 11(6), 1535. <https://doi.org/10.3390/su11061535>
- [6] Kervall M., Pålsson H. Barriers to change in urban freight systems: a systematic literature review.

Eur. Transp. Res. Rev. 14, 29 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00553-2>

[7] Shoman W., Yeh S., Sprei F. et al. A Review of Big Data in Road Freight Transport Modeling: Gaps and Potentials. Data Sci. Transp. 5, 2 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42421-023-00065-y>

[8] Yitao Yang, Bin Jia, Xiao-Yong Yan, Yan Chen, Lóránt Tavasszy, Michiel de Bok, Zhuotong Bai, Erjian Liu, Ziyao Gao. (2024). Structure and dynamics of urban freight truck movements: A complex network theory perspective. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Volume 158, 104442, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104442>.

[9] Diana M., Pirra M. & Woodcock A. Freight distribution in urban areas: a method to select the most important loading and unloading areas and a survey tool to investigate related demand patterns. Eur. Transp. Res. Rev. 12, 40 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00430-w>

[10] Zhang, Bo & Yao, Tao & Friesz, Terry & Liu, Hongcheng. (2012). Urban Freight Transportation Planning: A Dynamic Stackelberg Game-Theoretic Approach. <https://arxiv.org/abs/1211.3950>

[11] Yevhen Kush, Vasil Skrypin, Andrii Galkin, Kostiantyn Dolia, Iryna Tkachenko, Nataliia Davidich. (2018). Regularities of Change of The Supply Chain Operation Efficiency, Depending on The Parameters of The Transport Process. Transportation Research Procedia. Volume 30P. 216-225, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.024>

[12] Omoush, Majd. (2022). The impact of the practices of logistic management on operational performance: A field study of road transport companies. Journal of Governance and Regulation. 11. 237-245. <https://doi.org/10.22495/jgrv11i4siart4>

[13] Stephen Kwasi Nkesah. (2023). Making road freight transport more Sustainable: Insights from a systematic literature review. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. Volume 22, 100967, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100967>.

[14] Laman H., Gregory M., & Oloufa A. (2024). Framework for Assessing the Sustainability Impacts of Truck Routing Strategies. Systems, 12(5), 169. <https://doi.org/10.3390/systems12050169>

[15] Hryhorak M., Lyakh O., Sokolova O., Chornogor N., Mykhailichenko I. (2021). Multimodal freight transportation as a direction of ensuring sustainable development of the transport system of Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 915. 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/915/1/012024>

[16] Butko M.P., Butko I.M., Ditkovska M.Yu., Murashko M.I., Oliichenko I.M., & Olifirenko L.D. (2020). A systematic approach and modelling in scientific research. Textbook. Kyiv: Centre for Educational Literature, 360.

А. Коробко, І. Семенов. Модель визначення ефективності транспортної системи на основі ризику втрати функціональної стабільності

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування транспортних систем за рахунок удосконалення моделі її оцінювання на основі ризик-орієнтованого підходу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішено задачі: виявлено основні фактори, що впливають на функціональну стабільність транспортних засобів в умовах функціонування транспортних систем; обґрунтовано модель оцінювання ефективності функціонування транспортної системи на основі функціональної стабільності транспортних засобів та з використанням ризик-орієнтованого підходу. Функціональна стабільність транспортних засобів є складною багатофакторною характеристикою, що визначає здатність рухомого складу надійно, безпечно та ефективно виконувати транспортну функцію у реальних умовах експлуатації. Її рівень формується під впливом внутрішніх технічних властивостей машини та широкого спектру зовнішніх факторів, пов'язаних із транспортною системою, інфраструктурою, середовищем, організацією перевезень та керуванням. Такий підхід дозволяє розглядати функціональну стабільність не як пасивну властивість транспортного засобу, а як керовану основу ефективності функціонування транспортних систем. Запропонована модель оцінювання ефективності транспортної системи показує, що: ефективність її функціонування пропорційна функціональній стабільності транспортних засобів, що в неї входять, яка, в свою чергу, зменшується (убуває) за експоненціальною залежністю; швидкість убуття визначається ризиком впливу на транспортний засіб зовнішніх факторів: чим більший ризик, тим швидше зменшується функціональна стабільність; модель враховує накопичену дію зовнішніх факторів з часом.

Ключові слова: транспортна система, перевезення, системний підхід, функціональна стабільність, зовнішній фактор, ризик, ефективність.

Andrii KOROBKO, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: ak82andrey@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Illia SEMENOV, PhD student, Head of the Laboratory, ¹Kharkiv National Automobile and Highway University, ²Kharkiv branch of the State Scientific Organization «L.Pohorilyi Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies», e-mail: illia.semenov@outlook.com. <https://orcid.org/0009-0007-2571-309X>

Дата надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/y1nzkc41>

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY FABRICATED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

The paper presents a systematized analytical synthesis of the current body of experimental data regarding the arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V titanium alloy, focusing on Wire Arc (WAAM) and Gas Tungsten Arc (GTAW-AM) technologies. WAAM is an arc-based additive manufacturing technology derived from conventional welding processes. The synthesis focuses on quantitative relationships between deposition parameters, thermal cycling effects, microstructural evolution, and anisotropy of mechanical properties. It is demonstrated that heat input control, interpass temperature, and deposition path strategy govern prior- β grain growth and α -phase morphology. Repeated thermal exposure inherent to layer-by-layer deposition promotes the formation of columnar prior- β grains aligned with the build direction and height-dependent α -lath coarsening, resulting in hardness gradients and anisotropy of tensile strength. Optimized GTAW-AM parameters ensure geometric stability of deposited beads and tensile strength exceeding 900 MPa. For the WAAM process under controlled interpass temperature conditions, the formation of refined Widmanstätten-type lamellar structures is characteristic, contributing to improved strength. In addition, comparative analysis of mechanical properties reveals pronounced anisotropy in ultimate tensile strength, yield strength, and elongation depending on specimen orientation relative to the build direction. Typical technological defects inherent to arc-based additive manufacturing, including porosity, residual stresses, and microstructural heterogeneity, are associated with heat input and cooling conditions. The findings define a consistent process–structure–property relationship for arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V and provide a scientifically grounded basis for optimization of arc-based AM technologies for critical structural components.

Keywords: Additive manufacturing, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), GTAW-AM, Ti-6Al-4V, microstructure, thermal cycling effects, prior- β grains, α -lath morphology, mechanical anisotropy, microhardness, process–structure–property relationship, material deposition.

INTRODUCTION

Titanium alloys, particularly Ti-6Al-4V alloy, are extensively employed in aerospace, biomedical, and energy sectors due to their high specific strength, excellent corrosion resistance, and biocompatibility. However, conventional subtractive manufacturing of titanium components is associated with high production costs and significant material waste, largely attributed to poor machinability and unfavorable buy-to-fly ratios. These limitations have stimulated the rapid development of additive manufacturing (AM) technologies for near-net-shape fabrication of high-performance titanium structures [1–2].

Among various AM processes, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), an arc-based Directed Energy Deposition (DED-Arc) technique derived from conventional gas tungsten arc welding (GTAW) and plasma arc welding (PAW), has emerged as a promising approach for large-scale titanium components. WAAM offers high deposition rates (up to several kilograms per hour), high material utilization efficiency, and good scalability for structural applications. The process involves layer-by-layer deposition of metallic wire feedstock, where an electric arc serves as the heat source. Process parameters such as welding current, wire feed rate, travel speed, and interpass temperature govern heat input, molten pool dynamics, thermal gradients, and solidification conditions, thereby directly influencing the resulting microstructure and mechanical properties. WAAM systems typically integrate a motion control platform (robotic or CNC-based), an arc welding power source, and a wire feeding mechanism, enabling precise control of deposition path and layer geometry [3–5].

Various arc- and energy-based technologies have been adapted for metal additive manufacturing. Arc-based processes include Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG-MAG), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Plasma Arc Welding (PAW), and Cold Metal Transfer (CMT), which differ in heat input characteristics, arc stability, and metal transfer mechanisms. In addition to arc-based approaches, other directed energy deposition technologies such as Direct Metal Deposition (DMD) and Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) have also been applied for the fabrication of metallic components. However, WAAM has gained particular attention due to its ability to produce large-scale structures with high deposition rates, high material efficiency, and relatively low equipment cost compared to laser- or electron-beam-based systems [2,17,18].

Previous studies have demonstrated that the repetitive thermal cycling inherent to WAAM leads to the formation of columnar prior- β grains aligned with the build direction, followed by the development of acicular α' martensite or lamellar $\alpha + \beta$ microstructures depending on cooling rate and heat accumulation [3, 6, 7]. The interplay between heat input, cooling rate, and subsequent thermal exposure significantly affects

phase transformation kinetics, residual stress evolution, and defect formation, including porosity and lack of fusion. These microstructural features ultimately determine tensile strength, hardness distribution, and anisotropy of mechanical performance [6–8].

Previous studies have shown that the microstructure of WAAM-produced Ti-6Al-4V is strongly influenced by thermal history and layer building strategy, leading to variations in grain morphology and texture that affect mechanical anisotropy and phase distribution [8, 9]. Additionally, WAAM-manufactured titanium exhibits higher hardness and altered machinability characteristics compared to conventional wrought material, impacting cutting forces and chip formation during drilling operations [10].

Despite extensive investigations, a systematic understanding of region-dependent microstructural evolution along the wall height — particularly the influence of repeated thermal cycles on phase morphology and property heterogeneity — remains incomplete. Therefore, further synthesis of experimental findings is required to establish robust correlations between welding parameters, microstructure formation mechanisms, and mechanical behavior of WAAM-fabricated Ti-6Al-4V components [8–10].

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

Early systematic investigations of arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V were conducted by Wang et al. (2013) [11], who demonstrated that WAAM processing leads to epitaxial growth of prior β grains along the build direction due to directional heat flow and repeated thermal cycling. The authors were among the first to experimentally confirm the formation of columnar prior β grains and heterogeneous lamellar α structures across the build height, establishing the fundamental relationship between thermal history and microstructural evolution in WAAM-fabricated titanium alloys.

In subsequent work, Wang et al. (2018) [8] further investigated the influence of interpass temperature and heat accumulation on phase morphology and mechanical performance. Their study showed that variations in thermal gradients significantly affected α -lath thickness, grain refinement, and hardness distribution along the wall height, thereby reinforcing the critical role of process-induced thermal conditions in controlling structure–property relationships in WAAM Ti-6Al-4V components.

Thermal history modelling has been demonstrated to be crucial for microstructural control. Murgau et al. (2019) [12] applied a coupled process simulation and microstructural model for GTAW-based deposition of Ti-6Al-4V, quantifying the evolution of α lath thickness and predicting the graded microstructure along the build height. Their findings emphasized that heat accumulation and local thermal gradients govern α/β morphology and ultimately influence mechanical properties. In addition, the authors employed finite element thermal simulation coupled with microstructural modelling and validated the predicted α -lath morphology through quantitative microstructural characterization.

Recent review studies have also explored advanced strategies for improving the performance of WAAM-fabricated components. A comprehensive analysis of nanoparticle-reinforced WAAM processes demonstrated that the incorporation of ceramic nanoparticles (carbides, nitrides, and oxides) can significantly enhance microstructural refinement and mechanical performance of deposited alloys. The authors systematically classified nanoparticle incorporation approaches and reported that appropriate nanoparticle additions improve yield strength and ultimate tensile strength, although excessive concentrations may lead to particle agglomeration and deterioration of properties. These findings highlight the potential of nano-scale reinforcement as a promising approach for microstructural control and performance enhancement in arc-based additive manufacturing systems [20].

Experimental investigations by Wu et al. (2018) [13] confirmed that interpass thermal histories during WAAM lead to variations in grain size, phase distribution, and hardness along the wall height, highlighting the importance of interpass thermal control for achieving homogeneous mechanical performance.

Machinability implications have also been reported. Alonso et al. (2020) [10] demonstrated that differences in as-built microstructure and residual stress states directly affect cutting and thrust forces during drilling, linking microstructural heterogeneity from WAAM to post-processing behavior. Similarly, Liu et al. (2023) [3] applied response surface methodology (RSM) to systematically investigate GTAW-AM thin-walled Ti-6Al-4V components. They showed that welding current, wire feed, and torch speed influence deposition geometry and graded α phase morphology, which correlates with height-dependent microhardness variations (~362 HV top, ~353 HV middle, ~341 HV bottom), demonstrating a strong process–structure–property relationship.

Further insights into practical machining were provided by Hoye and Cuiuri (2018) [14], who reported that additively manufactured Ti-6Al-4V thin walls exhibit lower milling forces but higher drilling resistance compared to wrought counterparts. This indicates that arc-based AM affects surface integrity and tool wear, emphasizing the need to consider microstructural gradients when planning post-processing.

In addition to studies focusing on thermal cycling and process parameter effects, recent investigations have explored variations in deposition strategy and their influence on both microstructure and mechanical behavior. Zhou et al. (2020) [15] examined WAAM Ti-6Al-4V specimens fabricated with different deposition paths and demonstrated that deposition route significantly affects prior- β grain orientation, surface waviness, and tensile performance by modifying local thermal histories and solidification patterns. Moreover, a recent study by Kim, Kam, and Lee (2025) [16] systematically characterized the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced via wire-arc additive manufacturing, showing that fine Widmanstätten α -lath structures formed during WAAM lead to enhanced strength compared to wrought alloys and that microstructural features strongly correlate with deformation resistance mechanisms.

Recent review studies on WAAM technologies highlight their potential for large-scale metallic component fabrication, while emphasizing the importance of controlling heat input, microstructural evolution, and residual stresses during deposition [19].

A recent review by Dwivedi (2025) [21] comprehensively analyzed the principles, process steps, and key challenges associated with Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). The authors highlighted that WAAM offers several advantages over conventional manufacturing techniques, including high deposition rates, improved material efficiency, reduced lead times, and enhanced production flexibility. However, they also emphasized that excessive heat input during deposition can lead to critical processing defects such as residual stresses, porosity, cracking, and delamination. The study provides a systematic overview of process planning strategies and defect mitigation approaches, illustrating how careful control of deposition parameters is essential for achieving high-quality metallic components. Importantly, the review underscores the relevance of WAAM for aerospace applications, where titanium alloys like Ti-6Al-4V require precise microstructural control and mechanical performance for load-bearing structures. This work establishes a foundational understanding of WAAM performance and challenges, serving as a basis for further research aimed at optimizing the technology for industrial-scale aerospace manufacturing.

Despite these advances, several limitations remain:

1. Few studies integrate thermal modelling, microstructural evolution, and experimental mechanical characterization into a unified framework.
2. Comparative analyses of different arc-based AM processes (e.g., GTAW-AM vs WAAM) are limited, complicating generalization of process–property relationships.
3. Systematic correlations between deposition conditions and machining loads for precision thin-walled components are scarce.

Therefore, the problem addressed in this work is the insufficient understanding of how arc welding-based additive manufacturing affects microstructure, mechanical properties, and machinability of Ti-6Al-4V alloys. The study aims to experimentally investigate the influence of process parameters on bead formation, microstructural evolution, hardness profiles, and machining performance, with the goal of defining strategies for improved structural and functional performance of titanium components.

RESEARCH AIM AND OBJECTIVES

The primary aim of this study is to critically analyse the influence of arc-based additive manufacturing (WAAM and GTAW-AM) on the microstructure, mechanical properties, and machinability of Ti-6Al-4V alloy. Special attention is given to the relationships between process parameters, thermal history, and residual stresses, as these factors directly affect structural performance and post-processing behaviour of additively manufactured titanium components.

To achieve this aim, the following objectives are addressed:

1. To summarise recent experimental and numerical studies on arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V, focusing on deposition strategies, thermal management, and resultant microstructural characteristics.
2. To evaluate the mechanical properties (tensile strength, hardness, ductility) and machinability of Ti-6Al-4V parts produced by arc-based additive manufacturing.
3. To analyse the effects of thermal cycles and residual stresses on the integrity and performance of deposited layers.
4. To identify gaps in current knowledge and suggest directions for future research aimed at optimising arc-based additive manufacturing processes for high-performance titanium alloys.

Arc-based additive manufacturing technologies, such as Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) and Gas Tungsten Arc Welding Additive Manufacturing (GTAW-AM), are highly relevant to the aerospace industry due to the critical demand for large, load-bearing Ti-6Al-4V components. Precise control of thermal cycles, microstructural evolution, and mechanical properties is essential to ensure structural integrity,

minimize anisotropy, and meet stringent safety standards in aircraft applications. Therefore, understanding the process–structure–property relationships in these technologies provides a scientifically grounded basis for optimizing additive manufacturing methods in aerospace structural elements.

RESULTS OF THE STUDY

3.1 Influence of Arc-Based Deposition Parameters on Geometry and Thermal History

Experimental studies on GTAW-based additive manufacturing demonstrate that welding current predominantly governs molten pool size and penetration depth, while torch travel speed controls heat input distribution and solidification rate. Wire feed rate exerts a secondary influence, affecting layer height and material deposition per unit area [3]. These parameters collectively determine the thermal history of deposited layers, including localized melting, rapid solidification, and repeated thermal cycling. Such thermal regimes directly affect microstructural development and, consequently, mechanical behavior and machinability.

3.2 Microstructural Evolution in WAAM and GTAW Processes

Both WAAM and GTAW-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V result in epitaxial growth of prior- β grains and formation of basket-weave α structures, with martensitic α' occasionally present in the β matrix due to repeated thermal cycling [3, 10]. WAAM-produced walls generally exhibit more uniform hardness along the build height, whereas GTAW-AM thin-walled components display height-dependent microstructural gradients caused by localized control of heat input and layer-by-layer solidification. The microstructure is therefore strongly linked to process parameters and deposition strategy, demonstrating a clear process–structure–property relationship.

Under optimized GTAW-AM process parameters ($I = 90$ A, wire feed speed $V_f = 900$ mm/min, and travel speed $V_s = 200.18$ mm/min), a thin-walled Ti-6Al-4V structure was successfully fabricated using a reciprocating deposition strategy. The deposited wall exhibited stable geometry with smooth side surfaces and no evident collapse at arc initiation or termination points (Figure 1a) [3], indicating adequate control of heat input and melt pool stability.

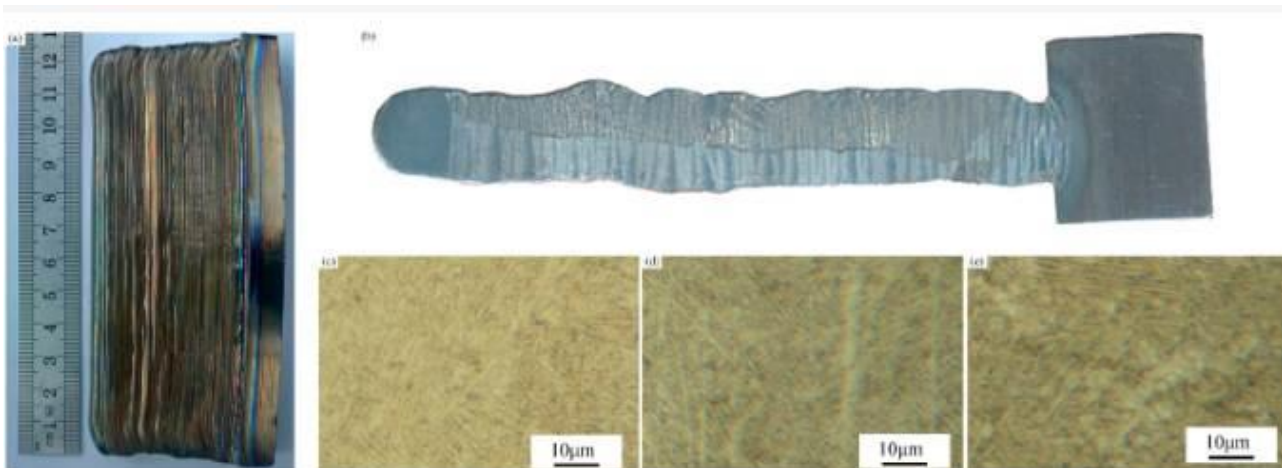


Figure 1. Optical microscopy of the TC4 titanium alloy RSM thin-walled part: (a) overall morphology, (b) macrostructural features, and (c–e) microstructural characteristics at different wall heights (top, middle, bottom). [3]

Metallographic examination revealed a pronounced layer-wise architecture resulting from repeated thermal cycling (Figure 1b). Distinct interlayer boundaries were observed in the middle and lower regions, manifested as light–dark contrasts, whereas such features were significantly less pronounced in the top region due to the absence of subsequent reheating cycles. The microstructure was dominated by coarse prior- β columnar grains extending nearly through the entire wall height, confirming directional solidification under a steep thermal gradient. Higher magnification observations ($500\times$) demonstrated a typical basket-weave $\alpha + \beta$ morphology across all regions (Figure 1c–e).

However, a clear gradient in α -phase morphology was identified along the build direction. The top region (Figure 1c) exhibited finer α lamellae, attributed to rapid heat dissipation and the absence of secondary thermal exposure. In contrast, the middle region (Figure 1d) showed relatively coarsened α plates due to repeated reheating [3]. The bottom region (Figure 1e) presented the coarsest α phase together with

short β columnar grains and partially equiaxed structures, reflecting prolonged heat accumulation and heat transfer toward the substrate.

This microstructural gradient confirms the strong dependence of phase evolution on local thermal history and demonstrates a clear process–structure relationship inherent to arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V.

Figure 1. Schematic representation of microstructural features along the wall height. Top regions show finer α -phase due to rapid cooling and limited thermal cycling, middle regions exhibit coarser α -phase due to reheating, and bottom regions contain coarser α -phase with short columnar β grains reflecting prolonged heat accumulation.

3.3 Mechanical Properties and Machinability Correlations

Microstructural characteristics directly influence mechanical performance and machining behavior. Areas with finer acicular α -phase and limited martensitic α' generally correspond to higher hardness and tensile strength, whereas regions with coarser grains show relatively lower hardness. This vertical gradient necessitates consideration of layer orientation and thermal management to ensure uniform mechanical performance. Machinability is similarly affected: increased hardness and α' content lead to higher cutting forces and torque, while regions with coarser microstructure are easier to machine. Knowledge of these microstructural gradients allows optimization of post-processing and machining strategies for additively manufactured titanium components [10].

3.4 Comparative Analysis of WAAM and GTAW-AM

- WAAM: Higher material throughput and more uniform mechanical properties along wall height; broader layer-to-layer uniformity in hardness.
- GTAW-AM: Finer control of layer geometry, pronounced height-dependent mechanical gradients, and localized microstructure control suitable for precision thin-walled components.

Both technologies emphasize the critical role of thermal cycles, residual stress, and process parameters in defining mechanical performance, highlighting the importance of integrating deposition strategy with microstructure management in titanium additive manufacturing [3, 10].

3.5 Practical Implications

Understanding the process–structure–property linkages in WAAM and GTAW-AM enables:

- Optimization of deposition strategies for desired microstructure and mechanical performance.
- Prediction of machining behavior and adaptation of cutting parameters to local hardness variations.
- Design of load-bearing components with controlled anisotropy and improved reliability for aerospace, biomedical, and other high-performance applications.

3.6 Key Experimental Data (Quantitative Findings)

Quantitative evaluation of arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V demonstrates direct correlations between deposition parameters, thermal cycling effects, microstructural evolution, and mechanical performance. In GTAW-AM thin-walled components, optimization via response surface methodology (Liu et al., 2023) [3] identified 90 A welding current, 900 mm/min wire feed speed, and 200.18 mm/min torch travel speed as conditions ensuring stable wall formation and controlled penetration geometry. Increased current and wire feed enlarged penetration depth and layer width, whereas higher travel speed reduced these dimensions. The resulting microstructure exhibited a height-dependent α -phase gradient governed by cumulative thermal exposure: fine α at the top (362.7 HV), coarser α in the middle (352.7 HV), and the coarsest morphology at the bottom (340.5 HV). Correspondingly, horizontal tensile strength reached 926 MPa with 12.2% elongation, while vertical strength increased to 938 MPa with 14.4% elongation, indicating limited anisotropy under optimized conditions.

In WAAM-fabricated walls, deposition at a rate of 2 kg/h and an interpass temperature of 600 °C (Alonso et al., 2020) [10] produced columnar prior- β grains and acicular α structures with gradual coarsening along the build height due to repeated thermal cycling. Hardness remained relatively uniform compared to laminated material, while machinability was characterized by shorter chips and reduced burr formation despite elevated cutting forces.

The influence of deposition path was further confirmed (Zhou et al., 2019) [15], where co-directional strategies enhanced vertical tensile strength, whereas reciprocating paths increased β -grain waviness and surface irregularity. Recent results (Kim et al., 2025) [16] demonstrate that cyclic thermal exposure in WAAM promotes refinement of Widmanstätten (α_w) α -laths, leading to higher tensile strength relative to conventionally processed alloys and emphasizing the governing role of solidification kinetics and interpass temperature control.

Collectively, these data establish quantifiable process–structure–property relationships in Arc-AM Ti-6Al-4V. Welding current, wire feed rate, travel speed, deposition path, and interpass temperature define molten pool dynamics and thermal history, which in turn regulate α -morphology, β -grain evolution, hardness gradients, tensile performance, and machining response.

3.7 Comparative Mechanical and Microhardness Data

Table 1 presents the comparative mechanical and microhardness data of Ti-6Al-4V components fabricated using WAAM and GTAW-AM techniques. The data indicate that the ultimate tensile strength (UTS) and yield strength (YS) exhibit anisotropic behavior depending on specimen orientation in the WAAM-fabricated walls, with the oblique direction demonstrating the highest UTS, whereas elongation at break shows an opposite trend, being maximal in the vertical direction (Table 1) [3,10,12,16]. Microhardness values remain relatively consistent across wall height for WAAM components, indicating uniform hardness distribution despite columnar prior- β grains and acicular α structures.

GTAW-AM-fabricated components, optimized via response surface methodology (RSM), show a height-dependent α -phase gradient with top α -phase finer (362.7 HV) and coarser α at the bottom (340.5 HV), reflecting the influence of repeated thermal exposure and controlled interpass temperature on microstructural evolution (Table 1). Similar observations have been reported [12], demonstrating that coupled thermal simulation and microstructural modelling can predict α -lath thickness and graded morphology along the build height, validated through microstructural characterization.

Comparative analysis demonstrates that microstructural refinement in both WAAM and GTAW-AM components significantly affects tensile performance and mechanical anisotropy, corroborating the quantitative process–structure–property relationships discussed in Section 3.6.

Table 1. Comparative mechanical properties and microhardness of Ti-6Al-4V components fabricated by WAAM and GTAW-AM [3,10,12,16]

Method / Deposition	Specimen Orientation	Ultimate Tensile Strength (UTS, MPa)	Yield Strength (YS, MPa)	Elongation at Break (%)	Microhardness (HV)	Microstructural Features
PAW-WAAM [10]	Horizontal	981 ± 36.3	917 ± 19.3	11 ± 0.9	301 ± 8	Columnar prior- β grains, acicular α structures
PAW-WAAM [10]	Vertical	925 ± 18.2	864 ± 22.8	15 ± 1.3	304 ± 5	Columnar prior- β grains, uniform hardness
PAW-WAAM [10]	Oblique	1094 ± 35.5	1020 ± 20.2	10 ± 0.5	294 ± 4	Highest UTS, slight anisotropy in elongation
GTAW-AM [3]	Horizontal	926	900	12.2	362.7–340.5	α -phase gradient along height, optimized parameters
WAAM [16]	—	—	—	—	—	Refined Widmanstätten α -laths, improved tensile performance
GTAW Wire-Feed AM [12]	Vertical / Horizontal (simulated)	~920–940	~880–900	12–14	350–365	Columnar prior- β grains; α -laths (Widmanstätten) with graded thickness along build height

3.8 Statistical Modeling of Process Parameters in GTAW-AM

Statistical modeling of GTAW-AM deposition using response surface methodology (RSM) demonstrates that welding current represents the dominant factor governing geometric stability and melt pool

characteristics (Table 2). For deposition layer width, current and travel speed were statistically significant, whereas wire feed rate exhibited negligible influence. Layer height was strongly affected by all three primary parameters, with current showing the highest F-value. Penetration depth was primarily controlled by welding current, with additional contribution from travel speed and $A \times C$ interaction effects.

The high R^2 values (>0.89) confirm strong predictive capability of the regression models, establishing quantitative relationships between process parameters and geometric responses. These findings provide a statistical foundation for the process–structure–property correlations discussed in Sections 3.6–3.7.

Table 2. Summary of statistically significant process parameters affecting geometric responses in GTAW-AM (after Liu et al., 2023 [3])

Response	Dominant Factor	Secondary Significant Factors	R^2
Layer Width	Welding current	Travel speed	0.8966
Layer Height	Welding current	Wire feed rate, travel speed	0.9665
Penetration Depth	Welding current	Travel speed, $A \times C$ interaction	0.9360

DISCUSSION OF RESULTS

Analysis of the studies by Liu (2023), Alonso (2020), Murgau (2019), Zhou (2019), and Kim (2025) [3,10,12,15,16] demonstrates a clear process–structure–property relationship governing arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V. The following analytical synthesis evaluates the influence of process parameters, thermal history, and microstructural characteristics on mechanical behavior and machinability.

Influence of Process Parameters on Geometric Stability and Thermal History

Liu (2023) [3] quantitatively demonstrated that welding current, wire feed speed, and torch travel speed directly control deposition geometry through modulation of heat input. Increased current enhanced penetration depth and layer width, while higher travel speed reduced melt pool dimensions. These findings confirm that geometric stability in GTAW-AM is fundamentally heat-input-driven.

A recent investigation by Kim, Kam, and Lee (2025) [16] further advances the understanding of microstructural evolution in WAAM-fabricated Ti-6Al-4V. The authors demonstrated that the formation of fine Widmanstätten α -lath structures, induced by cyclic thermal exposure and rapid solidification, significantly enhances tensile strength compared to conventionally processed alloys. Their findings reinforce the concept that heat accumulation, solidification kinetics, and α -morphology refinement are key factors governing the structure–property relationships in arc-based additive manufacturing. These results align with earlier studies emphasizing thermal history as the dominant mechanism controlling mechanical performance in WAAM components.

Zhou (2019) [15] extended this understanding by showing that deposition path strategy (reciprocating vs co-directional) significantly influences surface waviness and prior- β grain orientation. This suggests that not only scalar process parameters but also spatial deposition strategies dictate solidification behavior and thermal gradients.

Collectively, the analyzed studies indicate that heat input control and thermal cycling effects constitute the primary mechanisms governing arc-based deposition.

Similar conclusions regarding the dominant role of thermal history were reported by Murgau et al. [12], who demonstrated through coupled thermal simulation and microstructural modelling that temperature evolution during GTAW-based additive manufacturing governs α -lath morphology and microstructural refinement.

Quantitative microstructural analysis indicates that the average α -lath thickness in GTAW-deposited Ti-6Al-4V remains relatively stable across different bead configurations (~ 1.0 – $1.1 \mu\text{m}$), although a slight increase in α -lath thickness with increasing number of deposited beads has been observed due to additional thermal cycles promoting diffusional growth of the α phase [12]. A reduction in α -lath thickness is generally associated with increased strength but reduced ductility, highlighting the importance of thermal control during additive deposition. In contrast, the fraction of grain boundary α shows considerable variation, which is attributed to differences in prior- β grain size and crystallographic orientation within the deposited structure.

Microstructural Evolution: Prior- β Grain Growth and α -Phase Morphology

Across all studies, the dominant microstructural feature is columnar prior- β grains aligned along the build direction, reflecting directional solidification under steep thermal gradients.

Liu (2023) [3] observed progressive α -phase coarsening from top to bottom, correlated with decreasing microhardness. Similarly, Zhou (2019) reported a vertical gradient from fine basket-weave to

coarse α morphology, while Kim (2025) identified Widmanstätten α -lath structures formed by rapid cooling and layer-by-layer reheating [15, 16].

The formation of Widmanstätten α -lath morphology is associated with the diffusion-controlled decomposition of the β phase during cooling. Nucleation of α plates typically initiates at prior- β grain boundaries and subsequently propagates into the β grains in a lamellar arrangement. Under rapid cooling conditions characteristic of arc-based additive manufacturing, repeated thermal cycling may also promote martensitic α formation, further influencing microstructural refinement and mechanical response [12].

The convergence of reported findings suggests that repeated thermal cycling inherent to WAAM and GTAW-AM leads to α -lath coarsening, anisotropic grain morphology, and microstructural heterogeneity along the build height.

However, Kim (2025) [16] demonstrated that compared to wrought material, WAAM produces finer α -laths and lower β fraction, contributing to higher strength but reduced ductility. This highlights a key trade-off in additive processing.

Recent review studies further emphasize that microstructural heterogeneity in WAAM-fabricated components is strongly influenced by process parameters such as heat input, wire feed speed, torch travel speed, and interlayer temperature. Excessive heat accumulation and unstable deposition conditions may lead not only to microstructural coarsening but also to technological defects including porosity, residual stresses, and humping phenomena, which negatively affect structural integrity and mechanical performance. As highlighted in recent systematic reviews, careful optimization of process parameters and thermal management strategies is therefore essential to achieve a refined microstructure and stable mechanical properties in WAAM-produced metallic components [20,21].

Therefore, understanding the relationship between thermal history, microstructural evolution, and process-induced defects remains essential for optimizing WAAM processing of Ti-6Al-4V alloys.

Mechanical Performance and Anisotropy

Liu (2023) [3] reported tensile strengths of 926–938 MPa with moderate elongation (12–14%), indicating compliance with structural requirements for load-bearing components.

Kim (2025) [16] confirmed that WAAM material exhibits higher ultimate tensile strength than wrought Ti-6Al-4V due to α -lath boundary strengthening and restricted slip transmission. However, ductility remains lower due to stress concentration at α/β interfaces.

Zhou (2019) [15] demonstrated that tensile strength varies depending on deposition path, with co-directional deposition yielding higher vertical strength, reinforcing the presence of anisotropy.

Therefore, mechanical anisotropy in arc-AM Ti-6Al-4V arises from columnar prior- β grain alignment, α -lath morphology, and deposition strategy.

Machinability and Post-Processing Implications

Alonso (2020) [10] introduced a critical industrial dimension: machinability. WAAM material exhibited higher hardness than laminated plate, resulting in increased cutting forces, serrated chip formation, and reduced burr height.

This confirms that microstructural refinement and hardness directly influence machining response. When considered alongside Liu (2023), it becomes evident that geometric control and thermal input optimization not only affect strength but also downstream manufacturing performance [3].

Knowledge Gaps and Research Perspectives

Despite significant progress, limited quantitative correlation between α -lath thickness and cutting force magnitude has been established. In addition, residual stress distribution under varying deposition paths remains insufficiently characterized. Integrated modeling approaches combining thermal simulation with mechanical anisotropy prediction are still underdeveloped, and scalability challenges persist for large structural components requiring uniform microstructure.

Future research should focus on multi-layer thermal modeling, hybrid heat treatments, and real-time monitoring strategies to minimize microstructural heterogeneity.

The comparative evaluation of GTAW-AM and WAAM studies confirms that arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V is governed by heat-input-driven microstructural evolution. Optimized parameter selection enhances tensile strength while potentially increasing hardness and machining resistance, whereas deposition path strategy introduces additional anisotropy effects.

Collectively, these findings establish a comprehensive process–structure–property framework linking deposition parameters, thermal history, microstructure, mechanical performance, and machinability, providing a scientific basis for further advancement of arc-based titanium additive manufacturing technologies.

Analytical Evaluation of Reported Experimental Results

Within the framework of the analyzed studies, the synthesized data presented in Tables 1 and 2 further elucidate the process–structure–property interrelationships governing arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V. The comparative analysis of mechanical performance and statistical process modeling reveals a consistent process–structure–property relationship in arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V.

As demonstrated in Table 1, WAAM-fabricated components exhibit orientation-dependent tensile behavior characterized by moderate mechanical anisotropy. The highest ultimate tensile strength (UTS) is observed in the oblique direction, whereas elongation at break is maximized in the vertical orientation. This anisotropic response can be attributed to the formation of columnar prior- β grains aligned along the build direction and the development of acicular α or Widmanstätten α -lath morphologies. The repeated thermal cycling inherent to layer-by-layer deposition promotes epitaxial β -grain growth and progressive α -lath coarsening along the build height, thereby influencing strain distribution and crack propagation pathways.

In contrast, GTAW-AM specimens optimized through response surface methodology exhibit comparatively reduced anisotropy under controlled processing conditions. The statistically validated models summarized in Table 2 confirm that welding current represents the dominant process parameter governing deposition layer geometry and melt pool stability. The high coefficient of determination values ($R^2 > 0.89$) indicate strong predictive capability of the regression models, establishing a quantitative link between process parameters and geometric responses such as layer width, height, and penetration depth.

The dominant influence of welding current on penetration depth and layer width directly affects heat input and solidification kinetics. Increased current enhances melt pool volume and thermal accumulation, promoting coarser α -lath morphology at lower regions of the build due to prolonged thermal exposure. Conversely, optimized travel speed and controlled interpass temperature mitigate excessive grain growth and contribute to more uniform microstructural distribution. The observed α -phase gradient in GTAW-AM components reflects height-dependent thermal history, with finer α near the top layers and coarser morphology near the substrate.

Hardness measurements further support this interpretation. While WAAM components show relatively uniform microhardness distribution, GTAW-AM specimens demonstrate measurable hardness gradients associated with microstructural refinement. These variations correlate with tensile performance, confirming that microstructural morphology—specifically α -lath thickness and prior- β grain size—governs strength–ductility balance.

The combined evaluation of Tables 1 and 2 therefore substantiates that geometric stability achieved through statistical optimization translates into controlled microstructural evolution and predictable mechanical response. Heat input control, welding current regulation, deposition path strategy, and interpass temperature management collectively define molten pool dynamics, solidification rate, β -grain growth behavior, and subsequent α -phase transformation.

Overall, the findings confirm that arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V follows a deterministic process–structure–property pathway. Statistical parameter optimization enhances geometric accuracy and reduces variability, while thermal cycle management governs microstructural refinement and mechanical anisotropy. These results provide a robust framework for rational design and optimization of WAAM and GTAW-AM technologies for high-performance structural applications.

CONCLUSIONS

This analytical review provides a comparative evaluation of WAAM and GTAW-based arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V, emphasizing the interrelation between deposition parameters, thermal cycling, microstructural evolution, mechanical anisotropy, and machinability.

The synthesized literature data indicate that arc-based deposition is predominantly governed by heat input and interpass thermal history, which control solidification behaviour, prior- β grain development, and α -phase morphology. Repeated thermal cycling inherent to layer-wise deposition promotes columnar prior- β grain growth along the build direction and height-dependent α -lath coarsening, resulting in microstructural gradients that influence hardness distribution and tensile response.

Comparative analysis of reported studies shows that mechanical performance is strongly process-dependent. Optimized GTAW-AM regimes reported in the literature ensure geometric stability and reduced anisotropy while maintaining tensile strengths exceeding 900 MPa. Similarly, controlled WAAM deposition conditions contribute to refinement of Widmanstätten α -structures and elevated strength levels relative to conventionally processed material, albeit with inherent directional dependence associated with grain alignment. Machinability trends reported across studies demonstrate a clear correlation between α -lath

refinement, hardness increase, cutting force evolution, and chip morphology, confirming that process-induced microstructure affects not only structural integrity but also downstream manufacturing performance.

Comparative mechanical data reported in the reviewed studies further confirm the process-dependent variation of tensile strength, elongation, and microhardness in arc-deposited Ti-6Al-4V components.

Overall, the reviewed evidence supports a consistent process–structure–property–machinability framework for arc-based additive manufacturing of Ti-6Al-4V. Although anisotropy and microstructural heterogeneity remain intrinsic characteristics of arc deposition, the literature indicates that their magnitude can be moderated through precise control of welding current, travel speed, deposition strategy, and interpass temperature. These insights provide a scientifically grounded basis for further process optimization and industrial implementation of welding-derived additive manufacturing technologies.

The relevance of arc-based additive welding technologies is particularly significant for aerospace structural applications, where Ti-6Al-4V remains a critical load-bearing material, highlighting the practical importance of optimizing process parameters, microstructure, and mechanical performance for advanced aerospace components.

REFERENCES

1. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. Wohlers, T. (2012). *Additive Manufacturing and 3D Printing: State of the Industry—Annual Worldwide Progress Report*. Colorado, USA: Wohlers Associates.
3. Liu, H., Feng T., Chen, C., & Chen, H. (2023). Study on the Relationship between Process Parameters and the Formation of GTAW Additive Manufacturing of TC4 Titanium Alloy Using the Response Surface Method. *Coatings*, 13(9), 1578. <https://doi.org/10.3390/coatings13091578>
4. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
5. Martina, F., Mehnen, J., Williams, S.W., Colegrove, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6), 1377–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>
6. Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P.M., Wang, F., & Williams, S. (2011). Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 50(12), 3315–3322. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>
7. Kobryn, P.A., & Semiatin, S.L. (2003). Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2–3), 330–339. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00865-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00865-8)
8. Wang, J., Lin, X., Wang, J., Yang, H., Zhou, Y., Wang, C., Li, Q., & Huang, W. (2018). Grain morphology evolution and texture characterization of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.235>
9. Wang, J., Lin, X., Li, J., Hu, Y., Zhou, Y., Wang, C., Li, Q., & Huang, W. (2019). Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A*, 754, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.001>
10. Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., & Artaza, T. (2020). Experimental Investigation of the Influence of Wire Arc Additive Manufacturing on the Machinability of Titanium Parts. *Metals*, 10(1), 24. <https://doi.org/10.3390/met10010024>
11. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., & Antonysamy, Alphons A. (2013). Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(2), 968–977. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
12. Murgau, C. C., Lundbäck, A., Åkerfeldt, P., & Pederson, R. (2019). Temperature and Microstructure Evolution in Gas Tungsten Arc Welding Wire Feed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *Materials*, 12(21), 3534. <https://doi.org/10.3390/ma12213534>
13. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. (2018). Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.004>

- 14.Hoye, N., Cuiuri, D., Rahman Rashid, R.A. et al. (2018). Machining of GTAW additively manufactured Ti-6Al-4V structures. *Int J Adv Manuf Technol* 99, 313–326. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2494-8>
- 15.Zhou, Y., Qin, G., Li, L., Lu, X., Jing, R., Xing, X., & Yang, Q. (2020). Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 20, 138654. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138654>
- 16.Kim, S., Kam, D.-H., Lee, K.-A. (2025). Characterization of the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by wire-arc additive Manufacturing: Insights into fracture behavior and strengthening mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 939, 148399. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148399>
- 17.Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd ed.). Springer.
- 18.Ding, D., Williams, S., Martina, F., & Addison, A. (2021). Wire arc additive manufacturing. Elsevier.
- 19.Shah, A., Aliyev, R., Zeidler, H. & Krinke, S. (2023). A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. *J. Manuf. Mater. Process*, 7(3), 97. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>
- 20.Surner, N., Fuse, K., Wakchaure, K., & Patel, V. (2026). Wire arc additive manufacturing: A review on quality enhancement using nano-particle reinforcement. *Journal of Materials Research and Technology*, 41, 834-862. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.095>
- 21.Dwivedi, A. (2025). A Review of Wire Arc Additive Manufacturing: Principle, Defects, And Future Scope. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 13(8), 445-462. <https://doi.org/10.56975/ijcrt.v13i8.292347>

Кирилах С.В., Капустян О.Є. Мікроструктура та механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V, виготовленого за технологією Wire Arc Additive Manufacturing

У роботі представлено систематизований аналітичний синтез сучасного масиву експериментальних даних щодо дугового адитивного виробництва титанового сплаву Ti-6Al-4V з фокусом на технологіях Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) та Gas Tungsten Arc Welding Additive Manufacturing (GTAW-AM). WAAM — це технологія дугового адитивного виробництва, що базується на процесах дугового зварювання. Синтез спрямований на встановлення кількісно обґрунтованих взаємозв'язків між параметрами наплавлення, характеристиками теплового циклу, кінетикою тверднення та фазових перетворень, еволюцією мікроструктури й формуванням анізотропії механічних властивостей. Показано, що тепловкладення, міжшарова температура та стратегія траєкторії наплавлення є визначальними чинниками, які контролюють ріст зерен попередньої β -фази (prior- β grains) і морфологію α -фази. Повторні термічні цикли, притаманні пошаровому формуванню, зумовлюють формування колонкових зерен попередньої β -фази, орієнтованих уздовж напрямку побудови, а також висотно-залежне укрупнення α -пластин, що призводить до формування градієнта мікротвердості та анізотропії межі міцності при розтягу. Встановлено, що оптимізовані параметри GTAW-AM забезпечують геометричну стабільність наплавлених валиків і тимчасовий опір розриву понад 900 МПа. Для WAAM-процесу за умов контрольованої міжшарової температури характерне формування подрібнених пластинчастих структур типу Відманштеттена, що сприяє підвищенню міцності. Характерні для дугового адитивного виробництва технологічні дефекти, зокрема пористість, залишкові напруження та мікроструктурна неоднорідність, пов'язані з величиною тепловкладення та умовами охолодження. Отримані результати формують узгоджену модель взаємозв'язку «процес – структура – властивості» для дугових технологій адитивного виробництва титанових сплавів і створюють науково обґрунтовану основу для оптимізації параметрів виготовлення відповідальних конструкційних елементів.

Ключові слова: Адитивне виробництво, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), GTAW-AM, Ti-6Al-4V, мікроструктура, термічні цикли, зерна попередньої β -фази, морфологія α -пластин, механічна анізотропія, мікротвердість, процес – структура – властивості, осадження матеріалу.

КИРИЛАХА Світлана Вікторівна, здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю G8 «Матеріалознавство», кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій, магістрантка за спеціальністю G9 «Прикладна механіка» кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій», Національний університет «Запорізька політехніка» e-mail: lanakirilaha@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

КАПУСТЯН Олексій Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій», Національний університет «Запорізька політехніка» e-mail: aek@zp.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8979-8076>

Svitlana KYRYLAKHA, PhD student in the specialty of Materials Science, Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies, master’s student in the specialty G9 “Applied Mechanics” at the Department of “Integrated Welding Technologies and Structural Modelling,” National University Zaporizhzhia Polytechnic” e-mail: lanakirilaha@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

Oleksii KAPUSTIAN, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University Zaporizhzhia Polytechnic e-mail: aek@zp.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8979-8076>

Дата надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

<https://doi.org/10.36910/w8br9g87>

УДК 629.331.073:355.4
UDC 629.331.073:355.4

Pavlenko O.V., Yelistratov V.O., Kharkov O.A., Fesenko V.V.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

DIAGNOSTIC AND RESTORATION ALGORITHMS FOR MILITARY VEHICLES WITH AUTOMATIC TRANSMISSIONS

The Ukrainian automotive manufacturer KrAZ has supplied the Ukrainian Armed Forces with KrAZ-6510TE tractor units with automatic gearboxes. KrAZ has supplied the Armed Forces of Ukraine (AFU) with KrAZ-6510TE semi-trailer tractors equipped with automatic transmissions. Until now, vehicles fitted with such gearboxes had not been in service with the AFU. In active military units, due to a lack of experience and negligence in maintenance and in timely oil changes in accordance with the operating instructions, nearly all have broken down, rendering the AFU transport units unable to carry out logistics operations due to automatic transmission failures.

The paper examines methods for diagnosing and restoring the operational condition of KrAZ-6510TE semi-trailer tractors, which can be carried out either on-site or at the manufacturing plant through a series of organizational measures. To ensure the rapid resumption of logistics operations for the AFU, algorithms for diagnostic and restoration have been developed for military vehicles equipped with automatic transmissions.

The availability of AutoKRAZ PJSC's technical service can help reduce downtime for KrAZ vehicles during repair and maintenance work performed while the vehicles are in operation.

Key words: semi-trailer tractor, automatic transmission, military service operation, loss of operability, diagnostic and restoration algorithms.

INTRODUCTION

The AutoKRAZ private joint-stock company manufactures the KrAZ-6510TE semi-trailer tractor for the needs of the Ministry of Defence of Ukraine. This vehicle has high off-road capability and is designed for transporting oversized and heavy cargo on all types of roads and off-road. Production of this vehicle is concentrated at the Kremenchuk Automobile Plant, which is the sole national manufacturer with a nearly complete production cycle: from development and manufacturing to warranty and in-service support [1].

The all-wheel-drive KrAZ-6510TE semi-trailer tractor (Fig. 1) has successfully passed departmental trials, during which the military's comments were addressed, and the relevant design documentation was updated. The vehicle has been approved for operation and is supplied by the manufacturer for use by military units of the Armed Forces of Ukraine.



Figure 1 – KrAZ-6510TE Semi-Trailer Tractor

The development of this heavy vehicle model was carried out by the Kremenchuk plant in line with current requirements, with a view to fully meeting the military's logistics vehicle needs. The tractor unit is used as part of a road train to transport heavy military equipment (tanks, armored personnel carriers, artillery or rocket systems) on flatbed trailers or semi-trailers. The vehicle is capable of towing trailers with a gross mass of up to 70 tons.

The all-wheel-drive KrAZ-6510TE semi-trailer tractor with a 6x6 wheel configuration features a cab-over-engine layout [2]. The tractor is equipped with a 9JS150TA-B automatic transmission manufactured by

Shaanxi Fast Auto Drive Group Co., Ltd. (Fast Group). The frame, transmission, and all other vehicle systems are manufactured directly at the KrAZ plant.

The vehicle is equipped with a 460 hp diesel engine, which is most suitable for military use [3], transmitting its torque to the drive wheels through an automatic six-speed hydraulic transmission with a two-speed transfer case. The automatic transmission reduces the driver's workload, making the operation more convenient. Until now, automatic-transmission vehicles had not been used in military units of the Armed Forces of Ukraine. The operation of vehicles with automatic transmissions, particularly in combat conditions, has both advantages and certain disadvantages.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The type of transmission fitted to military logistics vehicles affects their operational effectiveness in combat and their ability to meet the army's logistical requirements.

One advantage of using automatic transmissions in wheeled military vehicles is the reduction in driver workload. In combat situations, drivers often work under stressful conditions and with little sleep, which significantly reduces their concentration and alertness. An automatic transmission substantially reduces the physical and mental strain on the driver by simplifying and reducing the number of control operations required. Vehicles with such transmissions are easier to operate in convoys, over rough terrain, and during equipment and casualty evacuations.

Another advantage is improved maneuverability in difficult road conditions [4, 5]. An automatic transmission allows for quick response to changes in terrain and the surrounding situation (mud, inclines, and rubble). Smooth torque delivery reduces the risk of wheel spin or stalling under load.

Military logistics units are often staffed with mobilized personnel, not all of whom have experience with multi-speed manual gearboxes in heavy trucks, or have none at all [6]. The time required for initial training or retraining, conducting exercises, and driver instruction for vehicles equipped with automatic transmissions is shorter than for vehicles equipped with manual transmissions. In such situations, soldiers who have driven civilian vehicles find it easier and quicker to adapt to driving heavy-duty military vehicles.

Modern automatic transmissions (especially hydromechanical ones with electronic control, or robotic ones) optimize engine speed and sometimes provide fuel savings compared to their manual counterparts.

The use of automatic transmissions reduces clutch and drivetrain wear [7]. Such a transmission protects the driver from making mistakes (for example, abrupt gear engagement, improper clutch use, etc.). Power flow transmission is significantly smoother, which extends the service life of the transmission under intensive operation.

Heavily loaded vehicles and road trains with automatic transmissions have greater off-road capability. In military tractors (e.g., Oshkosh HEMTT, MAN HX, Tatra Force), an automatic transmission provides better torque utilization when pulling away from a standstill with a heavy load [8]. The resumption of vehicle movement after stops is also faster.

When driving in a convoy or escort, it is important to minimize any speed drops. An automatic transmission ensures more uniform movement without loss of convoy pace.

However, operating vehicles with automatic transmissions in the armed forces poses several problems. The universally recognized ones include: the complexity of repair under field conditions; sensitivity to lubricant properties and quality of maintenance; higher cost and greater curb weight of the vehicle.

The higher unit cost and greater weight are inherent characteristics of such a solution. For example, a manual gearbox (ZF 16S 1820, 16-speed) weighs 270-320 kg; an automated manual transmission (ZF TraXon 12 TX) weighs 340-380 kg; a fully automatic transmission (Allison 4500 SP / 4800 SP, 6-speed) weighs 420-480 kg. Thus, the maximum weight difference between units reaches 100 kg.

The properties of lubricants and the quality and timeliness of maintenance are of decisive importance for the long-term operation of vehicles. Thus, before the war began, several dozen KrAZ-6510TE semi-trailer tractors were commissioned into the AFU. By 2024, almost all of them had broken down.

PURPOSE AND OBJECTIVE OF THE STUDY

A number of KrAZ-6510TE vehicles that had broken down were returned to the manufacturer. Upon inspection, it was found that most automatic transmissions had failed due to negligence in maintenance and in timely oil and filter element replacement. Consequently, maintenance personnel had either not been trained or had negligently performed their professional duties; the supply and timely replacement of the necessary filters and corresponding lubricants had not been ensured.

Thus, the AFU logistics units face the challenge of rapidly and reliably ensuring the technical readiness of vehicles equipped with automatic transmissions. To address this, it is proposed to develop effective diagnostic and restoration algorithms for military tractor vehicles with automatic transmissions.

RESEARCH RESULTS

Technical readiness algorithms are models and methodologies for maintaining equipment (especially in security forces) in operational condition. They may include calculating readiness indicators, reliability management, maintenance planning, equipment replacement prioritization, and applying process and systems approaches for continuous monitoring and improvement of reliability. In other words, they represent a set of actions to ensure that equipment is ready to perform tasks at any given moment. In general, there are two approaches to ensuring the technical readiness of vehicles: maintaining operability and restoring it.

However, failures of automatic transmissions or the entire powertrain in vehicles in service with AFU military units are events that have already occurred. And this is by no means an isolated incident – there have been more than ten cases of transmission failure out of the thirty military vehicles manufactured and put into service. If the automatic gearbox fails, the tractor becomes completely inoperable – it is, in effect, unable to move.

Therefore, the following diagnostic and restoration algorithms for military tractor vehicles with automatic transmissions are proposed for analysis, illustrated in the fig. 2 as a flowchart.

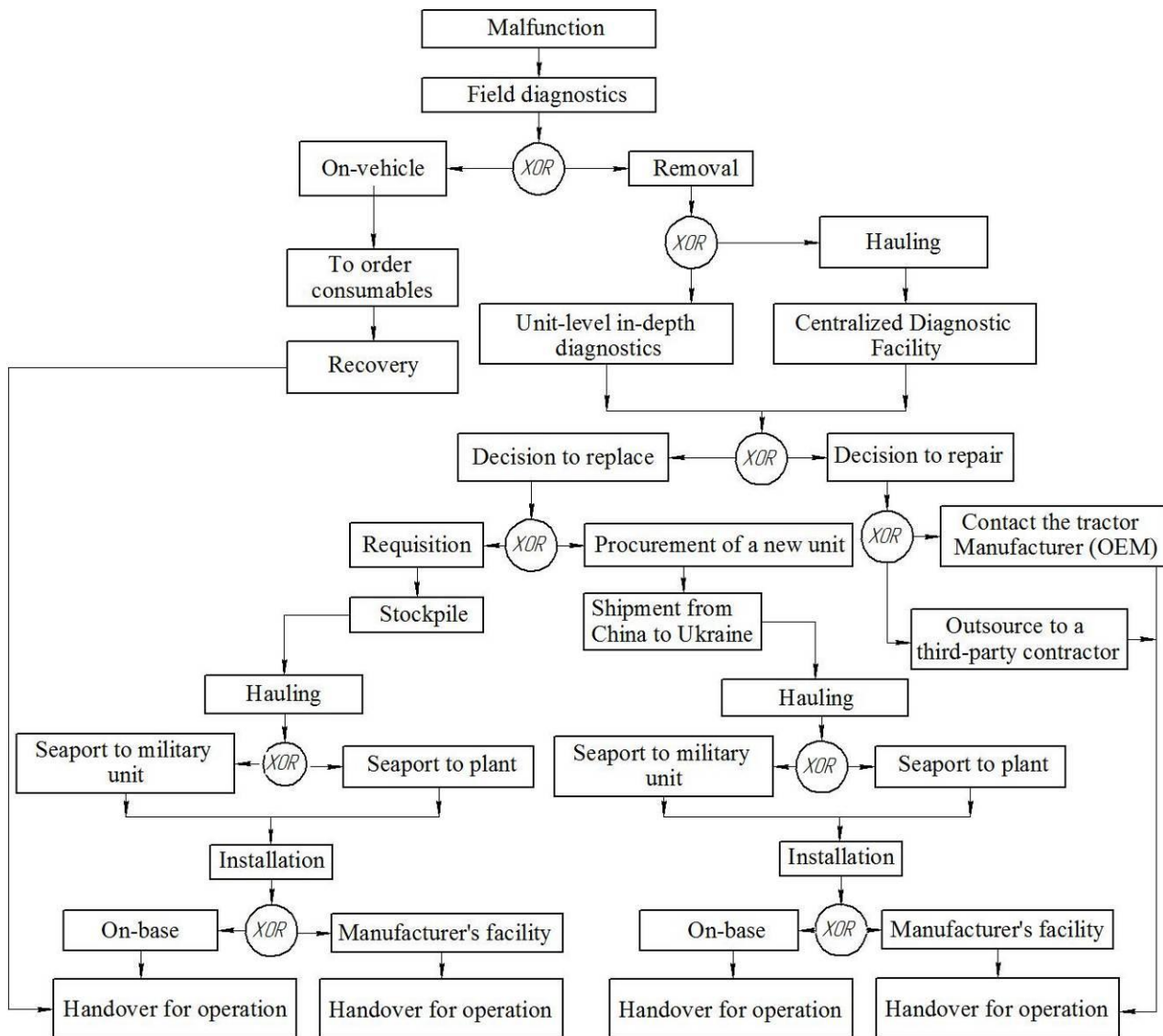


Figure 2 – Flowchart for diagnosing and restoring the operability of military tractor vehicles with automatic transmissions

The operational condition of an automatic transmission (and consequently the entire vehicle) cannot be restored without removing it from the vehicle. Removal of the transmission is carried out after testing with mobile diagnostic tools in accordance with the operating instructions for the relevant automatic transmission. In effect, this is done to confirm that the equipment cannot be used and to serve as the basis for

a more thorough diagnostic assessment and subsequent repairs. Such diagnostics and subsequent repairs require specialized diagnostic and repair equipment.

In-depth diagnostics and the subsequent repair of an automatic transmission using specialized equipment and tools require:

1. The availability of specialized means for performing technical interventions.
2. Training of personnel on how to use this equipment.
3. The availability of a dedicated facility to house such equipment.

Under current conditions, the following options for organizing in-depth diagnostics and repair of military vehicles with automatic transmissions can be considered.

1. Each military unit operating such vehicles establishes its own in-depth diagnostic and repair section for automatic transmissions.

Advantages: speed and convenience for the military unit in carrying out diagnostic and repair work on automatic transmissions.

Disadvantages of this option include: the need to set up a dedicated sub-unit to deal with this specific type of vehicle technical readiness support; the need to staff this sub-unit with highly qualified specialists and fit it with specialized tools, equipment, and reference literature; organizing an extensive supply chain for the necessary spare parts (assemblies); increased costs of funding the transport sub-units of all military units.

2. An in-depth diagnostic and repair section for automatic transmissions is organized at a rear military unit. Given Ukraine's well-developed road network and relatively small size, it is reasonable to assume that a single such section will suffice overall.

Advantages: given the number of semi-trailer tractors intended for the transportation of heavy equipment and the concentration of the greater part of them in individual military units, lower costs of organizing such a section would be achieved; the number of personnel requiring training would be minimal, and it would be easier to ensure the supply of the necessary spare parts.

Disadvantages: increased expenditure of material and human resources, as well as time for transporting failed automatic transmissions (vehicles) to the diagnostic and repair location and then back to the respective military units; and, as in the previous option, the need to staff the sub-unit with highly qualified specialists, fit it with specialized tools, equipment and reference literature, and the need to establish logistics supply chains for spare parts (assemblies), mainly from abroad.

3. The Ministry of Defense organizes full technical service for the automatic transmissions or vehicles equipped with them that have been commissioned into the AFU, at the manufacturer's territory, i.e., at KrAZ.

Advantages: minimal costs of organizing a diagnostic and repair section for automatic transmissions (vehicles); the availability of highly qualified personnel with experience working on automatic transmission assemblies who require virtually no additional training; established logistics supply chains for spare parts (assemblies) from domestic enterprises and from abroad; the possibility of carrying out diagnostics, maintenance and repair of other vehicle assemblies directly at the plant; reduction of the time required to perform the necessary technical interventions while simultaneously improving their quality.

Disadvantages: as in the previous option, greater expenditure of material and human resources, as well as time for transporting failed automatic transmissions (vehicles) to the diagnostic and repair location and then back to the respective military units.

To obtain information on the condition of the components of a failed automatic transmission, its partial disassembly may be permitted. Disassembly of automatic transmissions will require specialized equipment, which is more easily and conveniently located at a specialized automotive manufacturing plant.

Following in-depth diagnostics of the automatic transmission, a decision is made on whether to repair it or replace it. Once a decision is made to carry out repairs in Ukraine, the urgent question arises of where they are to be performed. If a decision is made to replace the unit, the question of the method and timeframe for obtaining a new automatic transmission arises. The installation of a new or repaired automatic transmission onto the vehicle from which it was removed also presents a considerable challenge for active military units. Again, these tasks are easier and quicker to carry out at the vehicle manufacturer's facility, which has its own experience with such operations.

From an organizational perspective, the decision to replace a failed automatic transmission is straightforward and very fast. To this end, one of the following courses of action must be implemented:

1. Order the assembly from a domestic warehouse (if available), transport the assembly to the location of the tractor vehicle, and install the transmission on the tractor.

2. Purchase a new automatic transmission from a foreign manufacturer (China), wait for it to arrive in Ukraine (3-4 months), transport it from the port to the location of the tractor vehicle, and install the transmission on the tractor.

Implementing the first course of action entails additional financial costs for purchasing the required number of automatic transmissions and for their preservation. The question of how many automatic transmissions need to be held in storage will remain open. It is obvious that this number will differ substantially between peacetime and wartime. It is likely that such an approach would also be advisable for the engines of military vehicles. The engine is also supplied from China (manufactured by Weichai Power Co., Ltd.). Having a stock of assemblies at a central warehouse enables the full benefits of the assembly-replacement method of organizing vehicle repair.

For the organization of the first course of action, a single, central storage warehouse for automatic transmissions and vehicle engines would suffice. This warehouse does not necessarily have to be located at an AFU repair unit. Nor is there a need to construct a new specialized facility, create warehouse infrastructure, or establish logistics. The existing warehouse infrastructure and logistics routes of the KrAZ enterprise, which already purchases and stores the said assemblies as part of its own production schedule, can be utilized. It is sufficient to purchase a somewhat larger number of engines and automatic transmissions, which would be stored at the plant's existing warehouse.

Furthermore, if spare assemblies are stored at the vehicle manufacturer's facility, it would be advisable to arrange replacement of failed transmissions and engines there rather than at a military unit. The existing KrAZ production base and the plant's workers' qualifications enable these operations to be performed quickly and to a high standard. However, this would require transporting the entire vehicle to the plant. However, given all of the above, this may not be a significant disadvantage.

Implementation of the second course of action requires an agreement with the foreign manufacturer of transmissions and engines to supply individual units as needed. It is understood that such an agreement can be formalized upon the conclusion of the main contract for a large batch of assemblies. The purchase of automatic transmissions and vehicle engines will take place in batches over a specified period, taking into account the vehicle production schedule, contract availability, and other factors. The transportation time for assemblies from China is at least two months. This means that vehicles will be out of service for at least 2-3 months due to logistical constraints alone. In comparison, the time required to transport the same assemblies within Ukraine is negligible. Once they arrive on Ukrainian territory, they are transported either to the military unit or to the automobile plant. This stage is not significant in terms of timelines or financial costs. Similar to the first course of action, the installation of the delivered assemblies can be carried out either at the military unit's location or at the automobile plant. A significant drawback of this course of action is that, throughout the period when spare assemblies are being delivered to the end consumer, the failed vehicles will be idle for an excessively long time, awaiting repair.

The repair of failed assemblies from military vehicles can also be carried out in two ways: by contacting the vehicle manufacturer or by finding a third-party contractor capable of repairing automatic transmissions and engines of foreign manufacture on the territory of Ukraine in the civilian sector.

Both approaches require equipping the repair organization with specialized equipment and tools, and training workers to perform repair interventions on assemblies from the Chinese manufacturer Weichai Power Co. As an alternative, it is possible to re-equip the trucks with powertrains featuring automatic transmissions from a different manufacturer. However, given that automatic transmissions for heavy trucks are not produced in Ukraine, this potential manufacturer would again be of foreign origin, which entails the same set of problems. There would also be a prolonged delay in obtaining the Ministry of Defense of Ukraine approval for the technical documentation. Such a delay could last several months.

CONCLUSION

The properties of lubricants and the quality and timeliness of maintenance are of decisive importance for the long-term operation of vehicles equipped with automatic transmissions. Failure to comply with these requirements prevents AFU transport units from conducting logistics operations due to automatic transmission failures in military vehicles.

To ensure the rapid resumption of logistics operations for the AFU, diagnostic and restoration algorithms have been developed for military vehicles equipped with automatic transmissions.

To mitigate the negative consequences of failures in vehicles with automatic transmissions, it is necessary to organize training for military vehicle drivers and maintenance personnel for the timely and quality execution (to the extent possible in an active army) of instructions on the organization of

maintenance and repair of motor vehicles in military units, and to ensure the availability, complete and timely supply of the necessary range of consumables and components for the vehicles in service.

The removal, disassembly, repair, and reassembly of an automatic transmission, which is a highly complex assembly, requires specially trained repair personnel, specialized tools, fixtures, and equipment, as well as a set of spare parts and materials. Therefore, the quality execution of the said work within military units appears highly doubtful.

In view of this, a realistic and effective solution in the event of the need to rectify a failure of a military vehicle's automatic transmission is the replacement of the entire assembly without disassembly, which is most appropriately carried out at the vehicle manufacturer's plant.

It is also more efficient to use the enterprise's available, accessible warehouses to store the necessary quantity and range of spare parts for the vehicles.

The availability of AutoKrAZ PJSC's technical service can help reduce downtime for KrAZ vehicles during repair and maintenance operations throughout their use.

REFERENCES

1. Kaidalov, R.O., Strashnyi, I.L., Marenko, H.M., Yelistratov, V.O., Shapko, V.F., Dun, S.V., & Hrebenik, O.M. (2020). Comparative analysis of structural and technical-operational parameters of Ukrainian armoured vehicles. Inter-university collection «SCIENTIFIC NOTES». Lutsk, LNTU, 69, 45-54.
2. High-Mobility Semi-Trailer Tractor KrAZ-6510TE. Operation Manual. Private Joint-Stock Company «AutoKrAZ». Kremenchuk, 2023, 199 p.
3. Korol, S.O., Moroz, M.M., Korol, S.S., Yelistratov, V.O., & Moroz, O.V. (2019). Development of a Moderator of the Pump Controlled Drive for the Engine. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, pp. 30-33.
4. Yelistratov, V.O., Tsioma, O.V. (2021). Features of operation and efficiency of armored vehicles. Bulletin of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University. Kremenchuk, 6(131), 104-109.
5. Pavlenko, O., Yelistratov, V., Levchenko, R., Kozlov, R., Kharkov, O., & Dmytriv, I. (2023). Features of the Car Wheel Rims Manufacturing Technology for Electric Cars. IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, pp. 1-5, DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402405.
6. Pavlenko, O.V., Yelistratov, V.O., Holovenskyi, V.V. (2024). Problems of ensuring a high level of technical readiness of military motor vehicles under combat conditions. Aviation and Astronautics: Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference, 18 April. Kryvyi Rih, p. 62.
7. Pavlenko, O.V., Yelistratov, V.O., Kharkov, O.A., & Moskvets, Yu.O. (2024). Operation and maintenance of automotive vehicles under combat conditions. Current Issues of Combat Employment, Operation and Repair of Armaments and Military Equipment: Proceedings of the IV International Scientific-Technical Conference, 13-14 November. Vinnytsia: VNTU, pp. 400-402.
8. Yelistratov, V.O., Mylenkyi, K.V., & Sydorenko, A.V. (2024). Problems of ensuring the technical readiness of military motor vehicles. Current Issues of Social Vitality: Proceedings of the XXXII International Scientific-Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, 23-24 April. Kremenchuk: KrNU, p. 25. DOI <https://doi.org/10.32782/2079-5009.krnu25.1.1>.

Павленко О.В., Єлістратов В.О, Харьков О.А., Фесенко В.В. Алгоритми діагностування та відновлення працездатності військових автомобілів з автоматичними коробками передач.

Вітчизняний виробник автомобільної техніки КрАЗ поставив на озброєння ЗСУ сідельні тягачі КрАЗ-6510ТЕ з автоматичними коробками передач. До цього часу автомобілі з такими коробками передач в ЗСУ не експлуатувалися. В діючих військових підрозділах через недбальство щодо технічного обслуговування та вчасної заміни мастила відповідно до інструкцій з експлуатації майже всі вони вийшли з ладу, що призвело до неможливості виконання логістичних операцій транспортними підрозділами ЗСУ через відмови автоматичних коробок передач автомобілів.

У роботі розглянуто способи діагностування та відновлення працездатного стану сідельних тягачів КрАЗ-6510ТЕ, які можна організувати безпосередньо на місцях або на підприємстві-виробнику за рахунок низки організаційних заходів. Для забезпечення швидкого поновлення операцій логістичного напрямлення для потреб ЗСУ створені алгоритми діагностування та відновлення працездатності військових автомобілів з автоматичними коробками передач.

Нааявність технічного сервісу ПАТ «АвтоКрАЗ» може забезпечити зменшення простою техніки КрАЗ під час проведення ремонтних робіт і робіт з технічного обслуговування машин в ході їх

експлуатації.

Ключові слова: сідельний тягач, автоматична коробка передач, експлуатація в збройних силах, втрата працездатності, алгоритми діагностування та відновлення працездатності.

ПАВЛЕНКО Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: alexander6170101@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8277-340x.

ЄЛИСТРАТОВ Вячеслав Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: yelisslava@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7931-7761.

ХАРЬКОВ Олександр Андрійович, старший викладач кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: alexkharkov37@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2561-4837.

ФЕСЕНКО Володимир Володимирович, студент кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: ghost24vov65@gmail.com, ORCID: 0000-0000-0000-0000.

Olexandr PAVLENKO, PhD, Associate Professor of the Department of automobiles and tractors Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: alexander6170101@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8277-340x.

Viacheslav YELISTRATOV, PhD, Associate Professor of the Department of automobiles and tractors Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: yelisslava@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7931-7761.

Olexandr KHARKOV, Senior Lecturer of the Department of automobiles and tractors Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: alexkharkov37@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2561-4837.

Volodymyr FESENKO, student of the Department of automobiles and tractors Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: ghost24vov65@gmail.com, ORCID: 0000-0000-0000-0000.

Дата надходження статті до видання: 09.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/xvg8s640>

Pelekh O. R., Salo Y. M.
*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine***SYNERGETIC SYNTHESIS OF SUSPENSION CHARACTERISTICS AND PNEUMATIC-AERODYNAMIC SYSTEMS OF A VEHICLE**

This paper addresses the complex scientific and applied problem of improving the ride smoothness, directional stability, and cross-country ability of vehicles through the development of a unified hybrid pneumatic-kinematic platform. Based on a systemic analysis of suspension methods and models, it is proven that classic linear systems have exhausted their adaptive potential, especially in the context of operating special and light-armored military vehicles under conditions of dynamic center-of-mass shifts and powerful impulse loads from technological equipment.

The article proposes and scientifically substantiates an advanced multilevel methodology (quasi-static, harmonic, impact, and stochastic profiles) for the experimental study of elastic elements. Detailed technical specifications of the testing equipment, including the specialized SS20 diagnostic stand and a precision electromechanical press, are provided. The physical and mathematical principles of springs with variable wire diameters, variable pitch, and combined dual-action systems (Dual-Spring) that provide progressive (polynomial or piecewise-linear) stiffness characteristics are investigated.

Numerical simulation using the developed "quarter-car" kinematic scheme confirms that the implementation of such nonlinear elements reduces the peak vibration accelerations of sprung masses by 15–20% at small disturbances, effectively preventing destructive suspension breakdowns under extreme loads. Furthermore, an innovative concept of external chassis adaptation using an aerocompensator (from the perspective of deformable soil terramechanics) is developed, and the feasibility of integrating a traction rotary pneumatic engine into the vehicle's overall energy contour with a function for recuperating the vibration energy of sprung masses is substantiated.

Keywords: vehicle suspension, mechatronic systems, variable stiffness, progressive spring, terramechanics, aerocompensation, pneumatic engine, quarter-car model, parametric synthesis, light-armored vehicles, hysteresis.

INTRODUCTION AND PROBLEM STATEMENT

The design of a vehicle's undercarriage plays a decisive role in ensuring its key operational properties: ride smoothness, active safety, directional stability, handling, and acoustic vibration comfort. Improving ride smoothness in an engineering sense means minimizing the amplitude of vibrations and vibration accelerations at the crew and passenger workstations. Since human physiology perceives vibrations of different frequency ranges differently, the selective filtration of resonant frequencies is a critical task in modern mechanical engineering. [1]

A fundamental contradiction in classical automotive theory is the rigid, sometimes insurmountable conflict between the requirements for ride smoothness and handling. As a rule, high ride smoothness is achieved by reducing the stiffness of the elastic element and decreasing the damping coefficient of the shock absorber, which inevitably leads to an increase in dynamic suspension travel. This contributes to the soft absorption of vibrations from the road microprofile but leads to a critical increase in body roll during high-speed maneuvering (cornering), "diving" during intensive braking, and an overall decrease in the vehicle's directional stability at high speeds. The opposite situation (using a "sporty," stiff suspension) makes comfortable driving over irregularities impossible and leads to rapid driver fatigue.

This problem becomes particularly acute in the design of light-armored vehicles (LAVs), dual-use equipment, and special transport. Systemic analysis shows that typical linear suspension systems cannot fully satisfy the stringent requirements for modern special equipment. The installation of non-standard equipment or weaponry significantly and often asymmetrically shifts the vehicle's center of mass. In addition, firing weapons or operating massive manipulators creates powerful periodic impulse loads, causing a significant oscillatory effect on the body (swaying). Under the influence of such oscillations, the vehicle can move unpredictably, lose kinematic connection and traction with the supporting surface, which is a direct prerequisite for emergency situations or a loss of target efficiency.[2]

The aim of this comprehensive study is to develop a methodological apparatus for the parametric synthesis of suspension characteristics based on the innovative integration of nonlinear kinematic elements (progressive springs), an adaptive pneumatic transmission, and aerodynamic unloading systems into a single hybrid mechatronic vehicle network.

To achieve this goal, the following objectives were set:

1. To conduct an in-depth analysis of existing methods and mathematical models for studying vehicle suspension systems.

2. To classify modern suspensions as integrated mechatronic systems, determining their energy and frequency limits.
3. To develop and implement a multilevel experimental methodology for studying nonlinear elastic elements using specialized equipment.
4. To synthesize the concept of external chassis unloading on soft soils from the perspective of terramechanics.

ANALYSIS OF RECENT RESEARCH AND PUBLICATIONS IN THE FIELD OF SUSPENSION DYNAMICS

When designing vehicle suspension systems, models and research methods are constantly applied and improved, the ultimate goal of which is the optimal spatial layout and selection of the physical parameters of the chassis.[3]

1. OVERVIEW OF EXISTING APPROACHES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Studies show a significant variety of approaches to solving the problem of suspension optimization. For example, modern literature details the impact of random characteristics of the road microprofile on the parameters of an electric vehicle's torsion bar suspension, where the main evaluation criteria were the total working travel of the suspension and the dynamic load transmitted to the wheel.¹ A separate promising direction is the study of non-standard hydraulic shock absorbers capable of absorbing significant amounts of energy by artificially increasing dynamic travel, which is physically impossible for traditional telescopic designs in the mass segment.

Considerable scientific attention is paid to modeling the vertical oscillations of wheeled vehicles, in particular, finding the conditions for the occurrence of resonant phenomena and determining the dependence of the oscillation amplitude on the restoring force of elastic elements for various kinematic schemes (double-wishbone, multi-link, dependent). At the same time, an analysis of the literature indicates that the theoretical basis for parametric synthesis remains incomplete. Most existing engineering methods for calculating the oscillations of sprung masses do not take into account the initial static state of the vehicle and the dynamic shift of the center of gravity depending on variable loading. Available mathematical models are often either excessively simplified (neglecting hysteresis, internal friction, and nonlinearity) or too cumbersome for rapid engineering use.[4]

2. SPECIFICS OF MODELING DUAL-USE EQUIPMENT (LAVS)

To adequately and accurately describe dynamic processes in military and special vehicles, it is necessary to apply a complex hybrid approach that organically combines two modeling components: continuous and discrete.

- The continuous component is implemented using finite element methods (FEM) and is mainly used to analyze the stress-strain state (SSS) of the solid metal hull (armored capsule or load-bearing frame) under the action of sudden impulse loads.
- The discrete component describes the kinematics of mounted equipment, suspension arms, and the elasticity of pneumatic tires in the form of systems of ordinary differential equations.

Traditional methodologies are often limited to a local SSS analysis only at the base of the rigid attachment of the torsion bar. However, modern structural synthesis requires the application of the theory of variational inequalities to account for complex elastic-plastic deformation along the entire length of the torsion bar and directly in the splined joints, which are stress concentration zones. Special attention is deserved by the structural formulation of the problem to obtain design solutions based on the analysis of hull stress state modeling during firing or manipulator operation, given a specified variation of a large set of design parameters.[5]

MATHEMATICAL MODELING OF SUSPENSION SYSTEM DYNAMICS

For the basic analysis of oscillatory processes and the preparation of a foundation for parametric synthesis, this work uses the "quarter-car" mathematical model. The input data for this simulation model are the mass-geometric characteristics of the body and wheels, the design of elastic elements, and the stochastic ordinates of the road microprofile. The output data are the accelerations, velocities, and displacements of the body and unsprung masses.

If we consider the suspension in motion as a classical single-mass (or two-mass) system, the general differential equation of motion for the sprung mass takes the form:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F_{pr}(x) = F_{ext}(t)$$

where:

m is the sprung mass (equivalent to the mass of a quarter of the vehicle body, taking the load into account);

c is the viscous damping coefficient of the hydraulic shock absorber;

$F_{pr}(x)$ is the nonlinear function of the spring's elastic force;

$F_{ext}(t)$ is the external disturbing force generated by the road profile.

Unlike the classic Hooke's law for an ideal linear spring ($F = k \cdot x$), in this model, the stiffness is not a constant but a variable function of the current deformation: $F_{pr}(x) = k(x) \cdot x$.

To mathematically describe real nonlinear elastic elements in modeling environments, two main approximations are used:

Piecewise-Linear Model (for springs with variable pitch): Accurately describes a system where coils close (touch each other) sequentially. It is represented by a system of equations:

$$F_{pr}(x) = k_{soft} \cdot x \quad \text{for } x \leq x_{crit}$$

$$F_{pr}(x) = k_{soft} \cdot x_{crit} + k_{hard} \cdot (x - x_{crit}) \quad \text{for } x > x_{crit}$$

where k_{soft} is the initial (low) stiffness of the comfort zone, x_{crit} is the critical moment of "collision" or closing of soft coils, and k_{hard} is the final (high) stiffness of the rigid section.

Power/Polynomial Model (for conical/barrel-shaped springs): For springs with a smooth transition of characteristics due to a change in the wire diameter itself, a polynomial approximation is used:

$$F_{pr}(x) = k_0 \cdot x + \alpha \cdot x^n$$

where k_0 is the basic (initial) stiffness at the beginning of the compression stroke, α is the progression coefficient, and n is the degree index (usually $n \geq 2$).

Such a mathematical model demonstrates a fundamental property: with an increase in the oscillation amplitude x (hitting a large pothole), the natural frequency of the vehicle suspension also increases, which automatically prevents low-frequency body swaying and avoids dangerous kinematic breakdowns.[6-9]

CLASSIFICATION OF SUSPENSION SYSTEMS AS INTEGRATED MECHATRONIC COMPLEXES

The modern approach to chassis synthesis requires viewing the suspension not as a set of isolated metal parts (arms, torsion bars, or springs) but as a complex mechatronic unit controlled by electronics. Depending on the type of actuators, the width of the frequency band, power consumption, and control range, mechatronic suspension systems are currently classified by science into five main groups:

Passive Level-Control Systems: Function exclusively in a quasi-static mode. Their main goal is to maintain a constant distance between the chassis and the road (clearance) regardless of the degree of static loading of the vehicle. Using air springs and low-power compressors, they allow for the preservation of soft, comfort-oriented settings and guarantee full dynamic suspension travel even with a fully loaded trunk or cabin. The power consumption of such a system is relatively low, amounting to 100–200 W.

Adaptive Systems: Implement a slow, programmatically planned change in basic characteristics (spring stiffness and hydraulic damper resistance). For example, an algorithm may lower the clearance and center of mass when the vehicle's speed increases (highway driving) to improve aerodynamics and provide sportier road holding. Their energy consumption depends directly on the speed and frequency of setting changes.

Semi-Active Systems: Characterized by the ability to rapidly adjust solely the energy dissipation (i.e., damper/shock absorber characteristics). The key technological difference is that the actuator only changes its resistance depending on the direction of the wheel's relative movement but is unable to independently input

energy (generate force) into the system. As a result, power consumption is extremely low (about 20–40 W per damper, e.g., when using magnetorheological fluid), yet the bandwidth reaches a significant 40 Hz.

Slow-Active Systems: Also known as low-bandwidth active systems. These include a powerful additional actuator (electric linear motor or hydraulic cylinder) installed in series with the primary spring. This actuator can generate suspension forces regardless of the relative movement of the chassis and wheel. They are highly effective at countering body roll in corners, but their bandwidth is limited to about 5 Hz, and power consumption is substantial, ranging from 1 to 5 kW.

Fully Active Systems: In these advanced complexes (high-bandwidth active systems), the classic passive damper is either completely replaced or duplicated by a powerful electro-hydraulic actuator with a bandwidth of 20 Hz and above. Actuators are installed in parallel with the spring and can instantly process any complex road profiles. The main and often critical drawback for mass adoption is enormous energy consumption, ranging from 4 to 20 kW, making their use in heavy machinery or electric vehicles energetically highly unjustified.

In the context of our study and to globally optimize the vehicle's energy balance, the most viable path is the development of a hybrid architecture: creating an intelligent passive base using nonlinear progressive springs with subsequent integration of external pneumatic circuits for slow load adaptation.[10-15]

MULTILEVEL METHODOLOGY AND EQUIPMENT FOR EXPERIMENTAL RESEARCH

Any mathematical model, no matter how complex, cannot be deemed adequate without thorough experimental verification. Typically, spring stiffness is calculated theoretically (using the classic formula of materials strength), but in practice, significant deviations are possible due to factory defects in metal rolling, metal fatigue after prolonged operation, corrosion, overheating, or technological peculiarities of the thermal coiling process. This error is especially pronounced in springs with complex shapes (cone, barrel), where the compression resistance changes highly nonlinearly.

To determine the actual characteristics, we developed and implemented a multilevel program of bench testing consisting of four main stages.

STAGE 1: QUASI-STATIC SPRING TESTING

Objective: Accurate determination of the dependence of the elastic force on the magnitude of deformation, construction of the $C_p(z)$ graph, detection of hidden hysteresis effects, load skewing, and residual deformation (spring sagging).

Equipment: For mass rapid testing, a specialized SS20-type diagnostic stand was developed. It allows for force measurements of cylindrical, conical, and barrel-shaped springs for passenger cars and SUVs. The stand solves 7 tasks: from incoming parts control to precision pairing of springs on a single vehicle axle (force difference must not exceed 12 kg) for motorsports.

Diagnostic Stand Parameter	Value
Full range of measured forces	0-2000 kg
Force measurement error	no more than ± 2 kgf
Maximum height of measured springs	500 mm
Spring height measurement range	100-500 mm
Spring height measurement error	no more than ± 0.2 mm
Range of internal spring diameters	68-150 mm

For precision scientific research measurements in laboratory conditions, a floor-standing hydraulic press (type Remax SD0804CE) was used in a complex assembly with a portable reference strain-gauge dynamometer (type DOSM-3-1). The strain sensor has a wide measurement range from 1 kN to 10 kN, a high sensitivity threshold of 0.02%, and a total error of no more than 0.8%. Before testing began, the equipment underwent a mandatory metrological calibration procedure on an ASMA-Prybor electronic electromechanical press: readings from the indicator were taken with an exact load step of 10 kg to build a reference calibration graph.[16]

Methodology (Step-by-step algorithm):

The tested spring is installed on the press support platform and carefully centered using a special centering element to prevent lateral ejection.

Pre-compression of the sample is performed (slow loading up to 80-90% of maximum) followed by unloading to eliminate any gaps in the stand's mechanical transmissions.

A light load of 5-10% is applied to stabilize the position, after which the strain gauge indicator scale is reset to zero.

Step-by-step loading is carried out using a jack with a fixed pointer movement step of exactly 5 mm. The force results are carefully recorded during both the forward stroke (compression until the coils fully close) and the reverse stroke (release/extension) to capture hysteresis losses.

STAGE 2: HARMONIC (SINUSOIDAL) DISTURBANCES

Objective: Construction of amplitude-frequency characteristics (AFC), identification of the system's resonant frequency zones, and determination of body vibration accelerations under periodic impact. **Methodology:** A strict harmonic signal following a sine law is generated on the dynamic vibration stand. The excitation frequency smoothly varies in the range from 0.5 to 20 Hz with a step of 1 Hz, and the disturbance amplitude is up to 25 mm. A data acquisition system (DAQ) equipped with accelerometers and linear potentiometers records the response of the sprung mass for each control frequency.

STAGE 3: IMPULSE LOADING (SINGLE OBSTACLE)

Objective: Evaluation of the suspension's ability to absorb sudden kinematic shocks (simulating hitting a speed bump, curb, or deep pothole) without a hard breakdown and its ability to quickly dampen residual free vibrations. **Methodology:** An impact-type stand generates an extremely short-term trapezoidal or rectangular impulse.

- Height of simulated obstacle: 30-100 mm.
- Impulse generation duration: 0.2-1.0 s.
- Simulated driving speed: 10-50 km/h.
- Platform load mass: up to 1500 kg. The electronics record the peak (maximum) body accelerations, the total time for vibrations to decay to rest, and the maximum compression stroke of the strut.

STAGE 4: RANDOM PROFILE (STOCHASTIC DISTURBANCE)

Objective: Maximally accurate modeling of the real operational process on public roads and evaluation of the human-operator's vibration comfort according to European standards. **Methodology:** A hydraulic vibration platform reproduces a so-called "white noise" road profile (in accordance with the ISO 8608 standard) over a wide frequency range with root-mean-square (RMS) acceleration. The duration of one continuous test is 30 minutes to simulate a long trip. The obtained frequency spectra and RMS indicators directly point to the level of physical fatigue the vehicle crew will experience during a march.[16]

PHYSICAL AND MATHEMATICAL ANALYSIS OF NONLINEAR STIFFNESS FORMATION METHODS

Solving the eternal conflict between smoothness and stability is effectively achieved by using elastic elements with progressive characteristics. Modern engineering offers three main technical methods for achieving nonlinearity:

Variable Coil Pitch: During manufacturing, coils are wound at varying distances from each other. When driving over minor irregularities, all coils work, but the "soft" coils with a small pitch deform the most, providing ride smoothness. When the load increases sharply (cornering, braking), these coils rapidly converge and touch each other ("close").¹ Since they stop working as a spring and become a solid metal spacer tube, the active length of the spring decreases, and overall stiffness increases abruptly. This reliably saves the suspension from breaking down and reduces body roll.

Variable Wire Diameter (Conical/Barrel-shaped): The steel wire itself narrows towards the edges. The operation of such a suspension is based on a law of physics: the thickness of the metal directly affects its ability to resist deformation. The thin end sections yield more easily to torsional twisting, ideally absorbing fine vibrations and acting as a "sensitive filter." Under strong impacts or high loads, these sections fully compress, and the thick central part, which has colossal resistance to deformation, comes into play. The advantage is an extremely smooth transition of stiffness, overall compactness (coils can nest inside one another, forming a flat disk), and enhanced durability (coils do not rub against each other, preventing corrosion).

Combination of Multiple Springs (Dual-Spring): A series connection on a single strut of a rigid (primary) and soft (helper/tender) spring via a movable aluminum divider ring. On a smooth road, both springs work simultaneously (the system's overall stiffness is lower than the softest of the two). During

aggressive maneuvers, the helper spring fully closes, instantly turning into a rigid spacer. After this moment, only the primary rigid spring works, instantly making the suspension "sporty."

ANALYSIS OF STATIC EXPERIMENT RESULTS

During laboratory testing (Stage 1), two samples of rear suspension springs for the popular ZAZ vehicle were examined in detail.

Sample No. 1 (Linear Spring): Constant steel wire diameter of 12 mm, outer diameter of 154 mm, length 228 mm, mass 1.80 kg. Despite the constant wire cross-section, the spring in practice demonstrates slight nonlinearity. Its compression process is best approximated by a linear equation :

$$C_p = 44392z + 22811$$

where z is the magnitude of vertical deformation. The relative error of the constructed model is 4.32% (root-mean-square error is 1093.91 N/m). During unloading (release), an entirely different relationship is observed ($C_p = 64987z + 20211$), which directly indicates significant hysteresis and internal friction within the structure. The stiffness range varies from a minimum of 19019.42 N/m to 30691 N/m. Because such a spring offers almost identical resistance at every millimeter of travel, it cannot provide a high level of comfort on minor irregularities.

Sample No. 2 (Progressive Spring): Variable wire diameter (narrowing to 8.4 mm at the edges, thickening to 14 mm in the center), outer diameter 156 mm, length 240 mm, increased mass of 2.2 kg. This innovative component shows a highly pronounced curvilinear resistance dependence, best described by a second-order polynomial:

$$C_p = 106z^2 + 109971z + 18992$$

The error of this complex model is 5.6% (1045.1 N/m). The minimum stiffness at the very beginning of travel (comfort zone) is only 10911 N/m (providing exceptional absorption of the microprofile), and the maximum grows exponentially upon compression, reaching an impressive 26569.8 N/m.

According to the results of many hours of numerical dynamics modeling (in specialized environments like MATLAB/Simulink), implementing such a progressive polynomial characteristic guarantees a reduction in peak body vibration accelerations by 15–20% in the zone of small disturbance amplitudes, while 100% ensuring platform stabilization and preventing hard impacts during extreme maneuvers.[16-19]

INTERACTION WITH A DEFORMABLE ENVIRONMENT: TERRAMECHANICS AND AEROCOMPENSATION SYSTEMS

Optimizing the internal parameters of springs and shock absorbers brilliantly solves the comfort problem only on a hard asphalt surface. When operating transport and technological machines (agricultural and military equipment) in off-road conditions, a much more complex problem arises regarding the wheel's interaction with soft, deformable soil.

From the perspective of the science of terramechanics, the repeated passage of heavy propulsors over the same spot in a field causes excessive over-compaction of the fertile surface soil layer, which poses significant ecological damage and reduces crop yields. On the other hand, excessive vertical loading of the vehicle on loose supporting surfaces leads to the formation of a deep rut and a complete loss of support mobility (the vehicle "bottoms out").

The rolling of an elastic pneumatic tire on soil is an extremely complex physical process, because under pressure, both the soil itself and the rubber tire deform (actual contact occurs along a concave surface with a radius significantly larger than the radius of an undeformed wheel). To mathematically describe this phenomenon in engineering, the rolling of a pneumatic wheel is treated as the rolling of an absolutely rigid wheel with a fictitiously enlarged diameter D_1 . [19-20]

The depth of the formed rut h directly and critically affects the rolling resistance coefficient f_{PN} . The deeper the rut, the more energy is spent on crushing the soil, the greater the resistance, and, most importantly for our study, the higher the amplitude of low-frequency kinematic disturbances transmitted from the destroyed soil to the suspension arms. Classical kinematic tuning methods do not take into account tangential tire elasticity or speed, so a classic passive suspension cannot in any way change the properties of the soil beneath it.

Synthesis of an Innovative Solution: To combat this destructive phenomenon, it is proposed to integrate an aerocompensator (a powerful directional fan device) into the overall vehicle system, creating stable vertical aerodynamic thrust directed upwards. This lifting force partially but significantly reduces the effective static vertical load of the vehicle on the axle. Artificially reducing the pressure on the soil instantly leads to:

1. A radical reduction in the depth of the formed rut h , which proportionally lowers the rolling resistance f_{PN} and saves fuel.
2. A decrease in the amplitude of vertical wheel movements, which automatically reduces the input disturbance that the suspension must process and dampen.
3. A change in the system's natural resonant frequency of vibrations, as the effective sprung mass (m in the equation of motion) dynamically and controllably decreases.

INTEGRATION OF PNEUMATIC SYSTEMS: ROTARY ENGINES AND THE CONCEPT OF ENERGY RECUPERATION

Creating a fully-fledged adaptive mechatronic platform of the future inevitably requires transitioning to unified energy standards within the vehicle's chassis. In explosive production industries (mining, coal, chemical industry), where even minimal electric motor sparking is a critical explosion risk factor, pneumatic engines have been widely and successfully used for decades. They are characterized by an extremely low relative weight per unit of power output, absolute resistance to colossal overloads (they can be stopped by external load to a complete halt of the shaft without any thermal or mechanical damage), and the ability for instantaneous reverse rotation.

EXPERIMENTAL STUDY OF A PNEUMATIC TRACTION DRIVE

To verify the technical feasibility of their direct use in wheeled transport, a series of experimental studies were conducted on the traction properties of a rotary pneumatic engine (created on the basis of an industrial impact pneumatic wrench). The assembled laboratory experimental setup included: 1 – air compressor (energy source); 2 – pneumatic wrench; 3 – optical tachometer; 4, 5 – digital multimeters for parameter recording; 6 – rheostat (potentiometer); 7 – electric brake motor for creating load.

The actual torque M was calculated based on the measured resistance moment of the electric brake using the classic formula :

$$M = \frac{9995 \cdot P}{N}$$

where P is the recorded power, and N is the rotor rotation frequency. It was experimentally confirmed that the output power can be easily, smoothly, and widely regulated by a simple change in the working air pressure, and the maximum output power characteristic remains practically constant and stable across all possible speed ranges.

However, the study revealed several critical design flaws. First, there is a catastrophically low overall energetic coefficient of performance (efficiency). Taking into account electrical losses in the primary compressor and aerodynamic losses in the pipelines, the total efficiency of the pneumatic system drops to an unacceptable 5–15% (for comparison, the efficiency of the isolated engine itself is 20–30%). Second, there is significant pollution of the surrounding air by exhaust oil aerosols and an extremely high level of acoustic noise during air discharge—up to 120 dB (while the current sanitary norm is 80 dB). Installing additional mufflers partially solves the noise problem but creates backpressure, which inevitably lowers the maximum rotor speed.[21-22]

DISCUSSION: SYNERGETIC SYNTHESIS AND THE DEVELOPMENT OF A HYBRID PLATFORM

In order to make the integration of such pneumatic engines into a vehicle's pneumatic transmission (according to the scheme: controller → pressure limiter → pneumatic receiver → compressor → electric battery → electric valve → pneumatic engine → wheel) engineering and economically rational, the authors propose a comprehensive concept of energetic synthesis directly with the operation of the suspension.

This innovative synthesis is based on three pillars:

1. Unified Energy Receiver: The pneumatic springs of the adaptive passive suspension (with clearance control function), the unloading aerocompensator, and the traction rotary pneumatic

wheel engines do not function in isolation but are powered by a single central accumulator of compressed air.

2. Recuperation of Body Oscillation Energy: Standard oil telescopic shock absorbers in the suspension are replaced by specialized double-acting pneumatic pumps. While driving over potholes, especially in heavy off-road conditions, the vertical oscillations of the body (the very ones that cause maximum discomfort to the crew) are not dissipated as useless heat but force the pumps to compress atmospheric air and pump it back into the receiver under high pressure. This revolutionary solution allows the recovery of a significant portion of lost kinetic energy, directly compensating for the extremely low efficiency (5-15%) of the traction pneumatic drive.
3. Intelligent Adaptive Flow Control: Using a control unit, the system dynamically changes priorities. On a flat, hard surface, all energy from the compressor and receiver is directed towards high-speed movement (pneumatic wheel traction). When entering loose, soft soils (swamp, plowed field), the automation instantly redirects part of the pressure to the aerocompensator. This reduces the physical immersion of the wheels in the soil (depth h) and rolling resistance (f^{PN}), tremendously facilitating the work of the traction engines and preserving mobility. At the same time, nonlinear progressive springs reliably insure the body against hard impacts during intense oscillations, guaranteeing the integrity of the frame and driver comfort.[23-24]

CONCLUSIONS

Nonlinearity as the Absolute Foundation of Comfort and Safety: It has been proven experimentally (on SS20 stands) and theoretically (in modeling environments) that the use of progressive springs (whose behavior is mathematically described by second-order polynomial equations or piecewise-linear models of physical coil closing) most effectively solves the fundamental conflict in automotive theory. They guarantee a wide comfort zone for small displacements (a 15–20% reduction in peak vibration accelerations) and exponentially increase their stiffness (from a basic 10.9 kN/m to an impressive 26.5 kN/m) under high dynamic loads, minimizing body roll in corners and 100% preventing kinematic suspension breakdowns.

Complexity and Multilevel Nature of the Methodology: Reliable and error-free design of adaptive suspensions for special equipment (especially for LAVs exposed to weaponry impacts) is impossible without applying hybrid modeling (combining continuous FEM models of the armored hull and discrete differential equations of suspension arm kinematics) paired with multilevel experimental verification (statics on 20-ton presses with high-precision DOSM-3-1 dynamometers, harmonic vibration up to 20 Hz, 50-100 mm impulse impacts, and stochastic road profiles following the strict ISO 8608 standard for 30 minutes).

Mechatronic Synergy and Breaking Traditional Boundaries: Maximum ride smoothness in extreme off-road conditions is achieved exclusively by stepping outside the standard kinematics of suspension arms. The integration of an innovative aerocompensator allows direct and controlled influence on the terramechanics of tire-soil interaction (reducing effective pressure, critical rut depth, and overall rolling resistance), which is the most effective "external" method for combating disturbances, simultaneously significantly reducing ecological damage to agricultural lands.

Global Energy Integration: Although rotary pneumatic engines have significant inherent flaws (noise up to 120 dB, systemic efficiency of 5-15%), their use in specialized transport becomes technically justified and economically viable exclusively if a closed mechatronic chassis ecosystem is created. Harnessing the undesirable kinetic energy from body oscillations to generate compressed air via innovative pump-shock absorbers allows simultaneously powering the ecological transmission and the aerodynamic unloading system, forming a promising and self-sufficient architecture for highly efficient hybrid platforms of the future.

REFERENCE

1. Pelekh, O. R., & Zinko, R. V. (2024). Application of car suspensions with a non-linear spring. *Modern technologies of the industrial complex*, 173–174.
2. Tkachuk P.P., M.G. Grubel, M.B. Sokil, R.A. Nanivskyi. Evaluation of the impact of nonlinear suspension force characteristics on the firing efficiency of wheeled combat vehicles. *Military Technical Collection of the National Academy of Ground Forces named after Hetman Petro Sahaidachnyi*. 2016. No. 15. P. 42–47.
3. Malakey A.N. Mathematical model of dynamic processes in the body and running gear of a light-armored wheeled combat vehicle. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2005. No. 60. P. 98–120.

4. Sokil B.I., R.A. Nanivskyi, M.G. Grubel. Natural vertical oscillations of a vehicle body considering the nonlinear characteristics of the elastic suspension. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy: scientific and industrial journal*. No. 5 (235), p. 15–18. 2013.
5. Alexandrov E.E., Vorontsov S.N., Karpenko V.A., et al. Mathematical modeling of random road microprofile using a computer. *Bulletin of KhGPU*. 1999. Issue 60. P. 36–39.
6. Melnyk B.A., A.N. Malakey, D.S. Mukhin, A.Yu. Tanchenko, O.V. Kokhanovska. Mathematical and numerical modeling of dynamic processes in the elements of light-armored combat vehicles. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2013. No. 1(975). P. 93–117.
7. Nabokov A.V., N.A. Tkachuk, A.N. Malakey, A.V. Grabovsky, A.Yu. Vasiliev, S.V. Kutsenko, A.Yu. Tanchenko, E.S. Ananyin. Mathematical modeling of dynamic processes in the body of a light-armored vehicle under pulse loading. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2018. No. 7(1283). P. 76–85.
8. Tkachuk M.A., A.V. Nabokov, A.V. Grabovsky, O.M. Rikunov, M.M. Tkachuk, S.I. Marusenko, I.Ya. Khramtsova, O.V. Kokhanovska, M.V. Prokopenko, O.S. Loznyi, Y.S. Chala. Analysis of the response of test spatial structures of light armored vehicle bodies under series of pulse impacts. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2020. No. 2. P. 117–139.
9. DJiang, C.Pierre, S.W.Show. Large-amplitude non-linear normal modes of piecewise linear systems // *Journal of Sound and Vibration*. - 272. - 2004. - P. 869-891.
10. Brul, S. T., Tkachuk, N. A., Vasiliev, A. Yu., & Karapeychik, I. N. (2011). Modeling of physical and mechanical processes in the hulls of light armored vehicles: approaches, models, effects. *Mechanics and Machine Building*, 1, 66–73.
11. Muhammad Haroona, Douglas E. Adams, Yiu Wah Luk, Aldo A. Ferri. A time and frequency domain approach for identifying nonlinear mechanical system models in the absence of an input measurement. *Journal of Sound and Vibration*. 283 (2005). P. 1137–1155.
12. Dushchenko V.V. Suspension systems of military and wheeled vehicles: calculation and synthesis: textbook. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 336 p.
13. Grabovsky A.V., M.M. Tkachuk, A.V. Zavorotny, S.V. Kutsenko, M.S. Saverska, I.Ye. Klochkov, M.A. Tkachuk, O.I. Zinchenko, R.P. Derevyankin. Contact interaction of a torsion shaft with a splined sleeve under elasto-plastic deformations. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2021. No. 1. P. 34–46.
14. Shui-Ting Zhou, Yi-Jui Chiu, I-Hsiang Lin. The parameters optimizing design of double suspension arm torsion bar in the electric sight-seeing car by random vibration analyzing method. *Shock and Vibration*, vol. 2017(22), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/8153756>.
15. Wang R.L., J.Z. Zhao, G.Y. Wang, X.K. Chen, L. Li. Modeling and kinematics simulation analysis of conventional suspension with double trailing arms for light off-road vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 312, pp. 673–678.
16. Tian G., Y. Zhang, J.-H. Liu, X.-J. Shao. Double wishbone independent suspension parameter optimization and simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 574, pp. 109–113.
17. Cherian V., I. Haque, N. Jalili. Development of a non-linear model of a double wishbone suspension for the characterization of force transmission to the steering column and chassis. *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE*, pp. 775–780, Anaheim, CA, USA, November 2004.
18. Mohamad N., Farhang K. A vibration model of a suspension–tire system. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 2B, pp. 1465–1476. Salt Lake City, Utah, USA, 2004.
19. Balike K.P., Rakheja S., Stiharu I. Development of a kineto-dynamic quarter-car model for synthesis of a double wishbone suspension. *Vehicle System Dynamics*. 2011, vol. 49, no. 1–2, pp. 107–128.
20. Zhao L., S. Zheng, J. Feng, Q. Hong. Dynamic structure optimization design of lower control arm based on ESL. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2012, vol. 4, no. 22, pp. 4871–4878.
21. Dushchenko V.V., S.M. Vorontsov, R.A. Nanivskyi. Study of energy losses in the suspension shock absorbers of the BTR-4 armored personnel carrier and assessment of the feasibility of applying an energy recovery system. *Military Technical Collection of the National Academy of Ground Forces named after Hetman Petro Sahaidachnyi*. 2020. No. 23. P. 40–49.

22. Sokil B.I., R.A. Nanivskyi, Grubel M.G. Natural vertical oscillations of a vehicle body considering the nonlinear characteristics of the elastic suspension. *Automotive Transport: scientific-industrial journal*. 2013. No. 5 (235). P. 15–18.

23. Grubel M.G., O.P. Krasnyuk, M.B. Sokil, R.A. Nanivskyi. Vertical oscillations of the sprung mass of wheeled vehicles under random disturbances. *Scientific Notes: Collection of scientific papers; Lutsk National Technical University, Lutsk*. 2014. Issue 46. P. 112–116.

24. Grubel M.G., R.A. Nanivskyi, M.B. Sokil. Resonant oscillations of the sprung mass of wheeled vehicles when moving along an ordered system of irregularities. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2015. No. 1. P. 155–161.

Пелех О.Р., Сало Ю.М. Синергетичний синтез характеристик підвіски та пневмоаеродинамічних систем транспортного засобу

У представленій роботі вирішується комплексна науково-прикладна проблема підвищення плавності руху, курсової стійкості та прохідності транспортних засобів шляхом розробки єдиної гібридної пневмо-кінематичної платформи. На основі системного аналізу методів і моделей підресорювання доведено, що класичні лінійні системи вичерпали свій потенціал адаптивності, особливо в контексті експлуатації спеціальної та легкоброньованої військової техніки. Запропоновано багаторівневу методологію для експериментального дослідження пружних елементів. Досліджено закономірності роботи пружин зі змінним діаметром дроту, змінним кроком витків та комбінованих систем подвійної дії (Dual-Spring). Чисельне моделювання за схемою «чверть автомобіля» підтверджує, що впровадження таких нелінійних елементів знижує пікові віброприскорення підресорених мас на 15–20% при малих збуреннях. Крім того, розроблено інноваційну концепцію зовнішньої адаптації шасі за допомогою аерокомпенсатора з позицій терамеханіки та обґрунтовано можливість інтеграції тягового роторного пневмодвигуна в загальний енергетичний контур з функцією рекуперації енергії коливань.

Ключові слова: підвіска, підвіска транспортного засобу, мехатронні системи, змінна жорсткість, прогресивна пружина, терамеханіка, аерокомпенсація, пневматичний двигун, модель кватеркара, параметричний синтез, легкоброньовані машини, гістерезис.

ПЕЛЕХ Олександр Романович, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8410-9431.

САЛО Юліан Михайлович, аспірант кафедри систем автоматизованого проектування, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yulian.m.salo@lpnu.ua, ORCID: 0009-0002-9813-8616.

Oleksii PELEKH, Postgraduate Student of the Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8410-9431.

Yulian SALO, Postgraduate Student of the Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yulian.m.salo@lpnu.ua, ORCID 0009-0002-9813-8616.

Дата надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

<https://doi.org/10.36910/t1gzpw90>

УДК 378.147:62, 378.141:004.9, 331.522.4
UDC 378.147:62, 378.141:004.9, 331.522.4

Roșca-Sadurschi L., Ceclu L., Bunea M.
*Technical University of Moldova, "Bogdan Petriceicu Hasdeu" University Center of Cahul, Cahul,
Republic of Moldova*

TRANSFORMATION OF ENGINEERING EDUCATION IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: MULTI-ACTOR PERSPECTIVES AND CURRICULUM MODERNIZATION OUTCOMES

The transition towards Industry 4.0 requires a profound transformation of educational systems, with emphasis on developing transversal, digital, and technical competencies for young professionals. This article proposes an integrated framework for analysing the process of developing educational competencies in the context of the Fourth Industrial Revolution, based on: a systematic literature review, European-level statistical data on digital competencies, and results of an opinion survey administered to students, lecturers, and employers. The results highlight a significant gap between the competencies provided by current educational systems and the requirements of Industry 4.0. At the European level, only 55% of the population possesses basic digital competencies, with major variations across member states (ranging from 30% to 82%). Analysis of the questionnaires reveals that respondents consider technical competencies (data analytics, IoT, automation, cybersecurity) and transversal competencies (critical thinking, adaptability, interdisciplinary collaboration) as essential, yet report a low level of preparedness in these areas. This paper analyses the process of modernising engineering education in the Republic of Moldova, using the State University "B.P. Hasdeu" in Cahul as a case study. The research is based on a multi-actor audit conducted during 2024–2026, identifying training needs and evaluating the impact of updating core disciplines for the engineering and management profile. The results demonstrate a positive correlation between the introduction of digital tools and virtual laboratories and increased student interest in Industry 4.0 competencies such as product lifecycle management and circular economy.

KEYWORDS: Industry 4.0, curriculum modernisation, engineering education, multi-actor audit, educational competencies, digital engineering, digital transformation, professional training.

INTRODUCTION

The emergence of the Fourth Industrial Revolution, or Industry 4.0, imposes a fundamental reconfiguration of higher technical education systems, shifting from traditional educational models towards dynamic digital ecosystems. Industry 4.0, characterised by the integration of advanced digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data analytics, cloud computing, and cyber-physical systems into production processes, represents a fundamental transformation of the industrial paradigm [1]. This technological revolution generates new and complex demands on the workforce, requiring a profound reconfiguration of educational systems to prepare professionals capable of navigating this dynamic and technologically advanced environment [2].

At the level of the European Union, several initiatives have been undertaken, particularly with regard to policies and strategies in this field. The *Digital Decade 2030* initiative sets ambitious objectives: at least 80% of the adult population should possess basic digital competencies, and the number of ICT specialists should reach 20 million [3]. Eurostat data from 2025 reveal that 94% of individuals in the EU used the internet in the last three months, while 4% spent the entire year without internet access. Mobile devices were used to connect to the internet by nearly 9 in 10 people in the EU in 2025. 74% of individuals ordered or purchased services or goods online in the EU in 2025. ICT affects people's daily lives in many ways, both at the workplace and at home — for example, when communicating or purchasing goods or services online. EU policies range from regulating entire sectors, such as e-commerce, to attempting to protect individuals' privacy. Consequently, the development of the information society is considered by many to be essential for ensuring the conditions necessary to promote a modern and competitive economy [4].

This reality demands an urgent reconfiguration of educational paradigms, especially for those categories of professionals who will form the backbone of the digital economy: engineers, economists, managers, and IT specialists. Each of these categories presents specific competency needs, but also a common core of digital and transversal skills that facilitate interdisciplinary collaboration [5].

In Ukraine and the Republic of Moldova, this process is accelerated by the need to align with European standards and by labour market pressure for specialists capable of utilising cyber-physical systems and smart technologies. The implementation of European projects responds to this imperative, aiming to increase graduates' employability by digitalising the training processes and modernising courses in areas such as engineering and industrial processes, the ecology of industrial production, industrial production management, and human resources management in industrial entities.

This article addresses three main research questions:

1. What are the key competencies required by young professionals in the context of Industry 4.0?
2. What is the gap between the current level of preparation and industry requirements, according to European statistical data and completed questionnaires?
3. What are the advantages and disadvantages of the modernised courses?

Industry 4.0 is not limited to technology; it represents an integrative way of thinking. The modern engineer must possess a hybrid profile, where solid technical expertise is complemented by advanced digital competencies, green skills, and transversal abilities such as critical thinking, creativity, and the capacity for continuous learning. This evolution is closely linked to the UN's Sustainable Development Goals (SDGs) and EU strategies such as the Green Deal and Fit for 55, which require rapid decarbonisation of industry and transport — a process impossible to achieve without a highly skilled workforce in areas such as e-mobility and energy efficiency.

For developing economies or those located in areas of geopolitical instability, such as Ukraine and the Republic of Moldova, the adoption of new technologies represents the only viable path to ensuring economic competitiveness and institutional resilience.

Aligning the engineering competency profile to these new requirements necessitates a systemic approach that goes beyond the simple updating of teaching content. A deep curricular modernisation is required, grounded in a multi-actor audit that synthesises the perspectives of the academic environment, students, and, critically, industrial partners.

The Republic of Moldova, in the context of these global trends, faces specific challenges related to limited technological infrastructure, reduced financial resources, and the gap relative to more digitally advanced economies. Nevertheless, the framework provided by European ERASMUS+ projects constitutes a valuable opportunity for accelerating the modernisation process and integrating international best practices into the national education system.

The State University "B.P. Hasdeu" in Cahul (USCH) participates in the DIGITRANS project — "Digital transformation of HEIs education process in Ukraine and Moldova for sustainable engagement with enterprises" (no. 101127683 — DIGITRANS — ERASMUS-EDU-2023-CBHE) — together with partners from Ukraine and Moldova: Chernihiv Polytechnic National University (CPNU), Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), Lutsk National Technical University (LNTU), Technical University of Moldova (UTM), and Alecu Russo State University of Bălţi (USARB). The project aims to modernise 35 courses across 9 study programmes, totalling 160 ECTS credits, with a focus on integrating Industry 4.0 technologies and creating sustainable partnerships with the business environment.

At the State University "Bogdan Petriceicu Hasdeu" in Cahul — which, as of April 2026 (following a merger process), became the "Bogdan Petriceicu Hasdeu" University Centre in Cahul, part of the Technical University of Moldova — within the study programme "Engineering and Management in Machine Building" (Automotive profile), six courses were modernised at undergraduate level. The present study focuses on analysing the results of testing these courses during the 2025–2026 academic year, examining the multiple perspectives of the actors involved and evaluating the impact of curricular modernisation on the quality of the educational process.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM FORMULATION

Recent academic literature consistently documents a substantial gap between the competencies provided by higher education institutions and industry requirements [1]. Students and graduates report that, although they consider Industry 4.0 competencies to be important, they feel insufficiently prepared, especially in the areas of information technology, innovation, practical experience, and inter-agency collaboration [1]. This education-industry gap is amplified by the rapid pace of technological change and the relative rigidity of traditional curricular systems [1]. The literature emphasises that the engineer of the digital era must possess a hybrid competency profile, where technical expertise is complemented by transversal, digital, and 'green' skills. Although terms such as the Internet of Things (IoT) and Big Data are well-established, their implementation in university curricula in the region faces challenges such as the rigidity of study programmes, lack of practical experience, and the gap between academic and industrial environments.

Current literature proposes multiple competency frameworks that combine technical, digital, personal, and innovation skills to align education with the requirements of Industry 4.0. Muzulon et al. (2025) [5] structure 47 competencies across seven dimensions (transversal, social, personal, cognitive, digital, green, technical), providing a comprehensive guide for curriculum design and training programmes. This framework emphasises that Industry 4.0 specialists can no longer be defined exclusively through

technical competencies, but require a multidimensional profile. Ada et al. (2021) [7] propose a practical roadmap for human resources managers and workforce planning in the transition to Industry 4.0, identifying critical competencies according to industrial sector and organisational size. Soliani et al. (2025) [8] describe a competency-based educational model for professional training in Industry 4.0, integrating technical, interpersonal, and cognitive competencies into short training programmes, with measurable results regarding increased participants' confidence and interpersonal skills.

The integration of the Internet of Things, cyber-physical systems, and advanced connectivity for monitoring and control represents a central direction in modernised curricula. Kucera et al. [9] document concrete educational cases for training the „Engineer 4.0”, demonstrating how monitoring and control of discrete-event systems via OPC UA protocols and cloud applications can be effectively integrated into engineering study programmes. Project-Based Learning (PBL), challenge-based methods, and agile approaches are widely used to link theoretical concepts to real industrial applications [10, 11]. Malhaire and Fougères [10] document the implementation of PBL for engineering students in the context of Industry 4.0, with an application to assembly systems in the automotive industry, demonstrating that collaborative projects with industry significantly increase students' interest and practical preparation. The competency typology identified by Piazer et al. in the Portuguese context organises competencies into six main domains: Technical, Flexibility, Inter-Agency Interaction, Soft Skills, Innovation, and Information Technology. This typology was used in empirical assessments with students, highlighting significant gaps particularly in the domains of IT, Innovation, and Inter-Agency Interaction [1].

Literature analysis enables the identification of specific competencies for different professional categories involved in Industry 4.0. Table 1 summarises the technical and non-technical competencies for the members forming the success team within industrial entities — engineers, managers, and IT specialists — based on evidence from the analysed works.

Table 1. Required Competencies by Professional Category

Professional Category	Main Technical Competencies	Non-Technical Competencies	Representative Sources
Engineers	Data analytics, automation/robotics, IoT, programming, cyber-physical systems (CPS), digital twin, additive manufacturing, cloud computing	Problem solving, adaptability, teamwork, lifelong learning, critical thinking, creativity, interdisciplinary communication	[2], [9], [10], [11]
Managers / Economists	Understanding of Industry 4.0 technologies, project management, change management, data-driven decision making, digital transformation strategy	Strategic leadership, interdisciplinary collaboration, communication, decision-making, systems thinking, change management, resilience	[12], [13], [14]
IT Specialists	Big Data, cloud computing, distributed systems, cybersecurity, VR/AR for production systems, machine learning, IoT platforms, edge computing	Systems thinking, cooperation with OT teams, continuous upskilling, agility, complex problem solving	[15], [21]

Source: compiled by the authors.

Engineers' competencies are the most complex and widely analysed in the specialist literature. Motyl et al. [12] report the results of a questionnaire administered to engineers and engineering students, identifying data analytics, automation, IoT, and programming as the most in-demand technical competencies. The study emphasises that these technical competencies must be complemented by transversal skills such as problem solving, adaptability, and the capacity for continuous learning [12]. Rocha et al. [13] analyse the Brazilian context and confirm the importance of digital competencies and the capacity to integrate cyber-physical technologies into engineering practice.

Prieto et al. [2] describe the „Engineer 4.0” curriculum, which requires competencies such as virtual collaboration, resilience, social intelligence, adaptive thinking, cognitive load management, sense-making,

new-media literacy, design mindset, transdisciplinary approach, and computational skills. This extensive list reflects the growing complexity of the engineer's role in digitalised industrial ecosystems.

Managerial competencies for Industry 4.0 are analysed by Saniuk et al. [9], who emphasise the need for managers to understand emerging technologies without necessarily being technical experts, but to be able to make informed strategic decisions and lead digital transformation processes. Łupicka and Grzybowska [10] identify strategic leadership, interdisciplinary collaboration, effective communication, and data-driven decision-making as key managerial competencies. Więcek-Janka et al. [11] analyse the competencies required of managers in Polish family manufacturing enterprises, highlighting the importance of change management and resilience in the context of adopting Industry 4.0 technologies.

IT specialists require advanced technical competencies in Big Data, cloud computing, distributed systems, cybersecurity, and VR/AR support for production systems. The literature emphasises that IT education must integrate these emerging domains into the curriculum, preparing specialists capable of working in cyber-physical and smart factory environments. Systems thinking and the ability to cooperate with Operational Technology (OT) teams are identified as essential non-technical skills [10].

The literature documents multiple pedagogical strategies and models for curricular transformation in preparing the workforce for Industry 4.0. These approaches range from active laboratories and project-based learning to lifelong learning models and university-industry collaboration ecosystems.

Active laboratories and experiential learning are illustrated by the I4Tech Lab model described by Prieto et al. [2]. This engineering laboratory uses active learning, a dedicated laboratory architecture, and Industry 4.0 technologies to teach applied competencies in a hands-on environment. The implemented pedagogical model progresses through five stages: face-to-face sessions for theoretical grounding, individual practical training, group work on specific technologies, multidisciplinary problem solving, and competency assessment. This approach demonstrates the effectiveness of integrating experiential learning in engineering education.

Integration of real-world cases and blended learning is reported by Benis et al. [1] in the context of adapting engineering education during the COVID-19 pandemic. The authors describe the rapid migration to blended delivery, the integration of real industrial cases into the curriculum, and the continuous updating of content to reflect evolving technologies. This experience underlines the importance of curricular flexibility and institutions' capacity for rapid adaptation.

Competency-based curriculum design is addressed by Martynov et al. [21], who present principles, mathematical modelling, and an employer-oriented approach to designing professional educational programmes in engineering. The authors propose the use of information technologies to align graduate learning outcomes with production needs, ensuring the relevance and applicability of the developed competencies.

Lifelong learning and continuing engineering education are addressed by Chakrabarti et al. [21] and Azofeifa et al. [22]. These studies recommend building adaptive and personalised learning pathways, as well as stronger university-industry partnerships to support rapid reskilling and upskilling. Azofeifa et al. present a case study using a KSA (Knowledge, Skills, Abilities) taxonomy that illustrates personalised and adaptive approaches to continuing engineering education, visualising and mapping competencies to professional scenarios for personalised upskilling [22].

Liu et al. [2] propose an educational model that prepares students for Industry 4.0 by developing an educational ecosystem that includes faculty development, curricular alignment, and resource sharing. The model identifies the competency set required for the Industry 4.0 workforce and addresses challenges such as rapid technological change and digital skills gaps [2].

The Education-Industry Gap

Multiple empirical studies consistently document the existence of a significant gap between the competencies offered by educational systems and industry requirements in the context of Industry 4.0. This gap manifests across multiple dimensions: insufficient technical preparation, lack of practical experience, underdeveloped innovation competencies, and limited inter-organisational collaboration skills.

Gaps by competency domain are identified by Piazer et al. [1] in their study of Portuguese students. The authors report that the largest performance gaps are recorded in the domains of Information Technology, Innovation, and Inter-Agency Interaction, while behavioural competencies show smaller discrepancies. Students evaluate these competencies as important, but report a low level of preparedness, indicating an awareness of their own gaps.

Employer perceptions documented in multiple studies reveal that they consider graduates to be insufficiently prepared for the practical tasks of Industry 4.0, particularly in data analytics, systems

integration, and cyber-physical competencies. Motyl et al. [12] report that employers demand not only technical competencies, but also the ability to rapidly adapt to new technologies and the capacity to work in interdisciplinary teams.

SME capacity constraints are analysed by Walaszczyk [14], who notes that small and medium-sized enterprises often lack structured competency development and require targeted public training initiatives to effectively adopt Industry 4.0 technologies. The study analyses state-funded programmes in several European countries and extracts competency themes and policy-oriented recommendations for SME training.

Pedagogical deficiencies identified in reviews include curricular rigidity, insufficient hands-on and project-based learning, and limited faculty development. Martynov et al. [21] emphasise that traditional curricular systems fail to keep pace with the rapid rate of technological change, resulting in graduates with outdated or incomplete competencies.

Collectively, these studies recommend curricular redesign, stronger work-integrated learning, and improved university-industry collaboration to reduce the documented gaps.

The central problem lies in the need to balance theoretical and applied training, in a ratio recommended by experts of 40% theory and 60% practice. Furthermore, educational transformation cannot be achieved unidirectionally; a multi-actor audit process that integrates the perspectives of all stakeholders — from lecturers and students to representatives of student organisations and industrial partners — is essential.

Despite progress registered at the global level, regional universities in transition countries such as the Republic of Moldova face specific challenges in the process of modernising engineering education for Industry 4.0: limited technological infrastructure, reduced financial resources, a gap relative to more advanced economies, and limited capacity for industry collaboration. Although European ERASMUS+ projects provide a valuable framework for accelerating modernisation, there is a lack of empirical studies documenting the processes, outcomes, and lessons learned from such initiatives in the specific context of the Republic of Moldova.

The research problem of the present study can be formulated as follows: To what extent does the curricular modernisation carried out within the DIGITRANS project at Cahul State University respond to the requirements of Industry 4.0, how do the actors involved (students, academic staff, student organisations) perceive this modernisation, and what factors facilitate or limit the effective implementation of curricular transformations?

The aim of the research is to analyse the curricular modernisation process carried out at the State University "B.P. Hasdeu" in Cahul within the DIGITRANS project, examining the multiple perspectives of the actors involved and evaluating the impact of the transformations on the quality of the educational process in engineering. The present report aims to provide a comprehensive and multi-dimensional analysis of the development of educational competencies for Industry 4.0, with the following specific objectives.

Research objectives:

- To identify and analyse international trends in the transformation of engineering education for Industry 4.0, through a systematic review of specialist literature.
- To present the European statistical context by analysing Eurostat, DESI 2023, and other official sources to highlight the current level of digital competencies, variations between member states, and progress towards the Digital Decade 2030 objectives.
- To describe the context and process of curricular modernisation at USCH within the DIGITRANS project, including the characteristics of the modernised courses and the adopted pedagogical methodologies.
- To analyse students' perspectives on the quality, relevance, and impact of the modernised courses, based on feedback questionnaire results administered in the autumn semester 2025–2026.
- To analyse lecturers' perspectives on the importance, methods, and directions for improvement of the modernised courses.
- To examine the perspectives of student organisations on the transparency, accessibility, and quality of the curricular modernisations.
- To formulate practical recommendations for continuing and extending the curricular modernisation process at Cahul State University and in other similar institutions in the region.
- To propose an educational model structured in 6 stages for the systematic development of Industry 4.0 competencies, accompanied by a detailed competency framework organised by main categories.

- To formulate practical recommendations for educational institutions, industry, and policy-makers, based on the synthesised evidence.

RESEARCH RESULTS

The emergence of the Fourth Industrial Revolution, conceptualised under the name of Industry 4.0, has triggered a fundamental reconfiguration of production and management paradigms at the global level, imposing unprecedented pressure on higher education systems to produce specialists capable of navigating a technological landscape marked by the fusion of the physical, digital, and biological spheres. At the heart of this transformation lie cyber-physical systems (CPS), the Internet of Things (IoT), Big Data Analytics, autonomous robotics, and additive manufacturing — technologies that not only streamline industrial processes, but define new business models and social interactions.

In response to these challenges, several international, regional, and national policies and programmes have been launched. The European Union has developed a complex ecosystem of policies and initiatives to address the challenges of digital competencies in the Industry 4.0 era. Three main pillars structure this strategic approach: the *European Skills Agenda*, the *Digital Education Action Plan*, and the *Digital Skills and Jobs Coalition*.

European Skills Agenda: launched in 2020 and periodically updated, establishes an integrated vision for competency development in the EU, with emphasis on reskilling and upskilling for the green and digital transition. The Agenda recognises that digital competencies are not merely an educational objective, but an essential condition for social inclusion, economic competitiveness, and societal resilience [3].

Digital Education Action Plan (2021–2027): proposes two strategic priorities: (1) promoting the development of a high-performing digital educational ecosystem and (2) improving digital competencies and skills for digital transformation. The Plan underlines the need for digital infrastructure in schools and universities, for teacher training, and for the development of high-quality digital educational content [3].

Digital Skills and Jobs Coalition: brings together member states, companies, social partners, non-profit organisations, and education providers to act together to reduce the digital skills deficit. The Coalition facilitates the exchange of good practices, mobilises resources, and coordinates initiatives at the national and regional level [3].

These programmes have served as the foundation for formulating the objectives of the DIGITRANS project and for developing the corresponding competencies in students of the study programmes included in the project. The DIGITRANS project (ID: 101127683) represents an international collaborative effort, coordinated by Riga Technical University (RTU) from Latvia, which brings together a large consortium of universities and industrial partners from five countries. The central objective of the project is to increase graduates' employability and support sustainable economic growth in Ukraine and Moldova through the implementation of support measures for modernising engineering education.

The project strategy is based on several fundamental pillars: the integration of research with practical training, the development of innovative study programmes aligned with EU standards, the implementation of Double Diploma programmes, and the complete digitalisation of the educational process through infrastructures such as the SREE (Sharing Remote Experiment Environment) platform. Particular attention is paid to the resilience of the educational system in the context of the war in Ukraine, ensuring access to education for displaced or refugee students and lecturers through the DIGITRANS digital ecosystem.

A distinctive element of the DIGITRANS project is the multi-actor audit process, integrated into Work Package WP1 (Needs Analysis). This audit aimed to precisely identify the competencies required by the labour market in the context of digitalisation and to compare these with the current training profile in Ukrainian and Moldovan universities. Two complementary project stages can thus be synthesised:

- Analysis of competencies identified at the project outset (D1.3) — based on the questioning of 16 representatives of the academic environment and employers in March 2024;
- Evaluation of results after curricular modernisation (D4.1) — based on feedback from students and academic staff on three courses tested in the autumn semester of 2025.

The targeted study programme is Engineering and Management in Machine Building (Automotive), at undergraduate level (Cycle I), which includes 6 modernised courses, totalling 26 ECTS credits. The main industrial partners involved in the initial survey included ICS DRA Draexlmaier Automotive SRL, Cahul — a leader in automotive wiring harness production.

In March 2024, a comprehensive survey was carried out among representatives of the academic environment, researchers, and potential employers from key sectors: computer engineering, industrial automation, electronics, electrical engineering, and robotics. The survey used a questionnaire structured in 12

sections, aimed at evaluating the courses proposed for modernisation, the proportion of theory versus practice, and the need for digital resources (Table 2).

Table 2. Results of the initial stakeholder needs survey (N=16, March 2024)

Evaluated Indicator	Results and Preferences (%)	Implications for Modernisation
Support for new courses	100%	Validation of the thematic relevance of the project.
Theory / Practice ratio	40% Theory / 60% Practice	Need to expand laboratory and project hours.
Interest for specialists	75% – 92%	High relevance of new curricula for employers.
Access to digital resources	> 85%	Need for online libraries and open-source simulators.
Facilitation of remote practice	67% – 92%	Justification for investment in SREE laboratories.

Source: compiled by the authors.

This needs analysis served as the basis for the D1.3 report (Studies and Report on curricula needed to the labour market of UA and MD), a document that subsequently guided the selection of content for electronic textbooks (e-books) and the configuration of virtual laboratories.

The competency profile modernised within DIGITRANS is structured to ensure a smooth transition for the graduate from the academic to the professional environment, reducing the skills gap frequently reported by employers. Competencies are classified across seven essential dimensions: transversal, social, personal, cognitive, digital, green, and technical.

The technical dimension remains the foundation, but is redefined through the lens of smart technology integration. The engineer must understand the concept of the industrial product throughout its digital lifecycle (Digital Twin), master the modelling and solving of complex engineering problems using computers, and possess advanced experimental skills. In the field of transport management, specific competencies target the management of production processes, the quality of operations, and the technical exploitation of modern vehicles, including electric and hybrid ones.

The digital component is addressed by training students in the use of specific software for diagnosing, repairing, and maintaining modern transport, as well as in the use of programming and simulation environments. Transversal competencies such as entrepreneurship and project management are integrated to form an agile mindset capable of generating innovation within enterprises.

A critical aspect highlighted by recent studies and integrated into DIGITRANS is that of 'green' competencies. The engineers of the future must be aware of the ecological impact and possess knowledge of efficient energy systems and e-mobility, thus aligning with the global sustainability objectives.

Curricular modernisation within the DIGITRANS project is materialised through the development of 35 new or updated courses, of which 6 courses were modernised at the State University "B.P. Hasdeu", integrated into 9 accredited study programmes. The process is rigorous, monitored by the Quality Assurance and Management Team (QAMT) and grounded in the project Quality Assurance Plan (PQAP).

The study programme Engineering and Management in Machine Building (Automotive) includes 6 undergraduate courses, updated within the DIGITRANS project. Table 3 presents the synthesis of the courses subject to evaluation.

Table 3. Courses evaluated in the initial competency analysis — USCH Cahul

Course Title	Status	Level	ECTS	Teaching Methodologies
Design of Electric Machines	Updated	Bachelor	4	Lectures, practicals, lab sessions, tests
CAD Products	Updated	Bachelor	4	Lectures, practicals, lab sessions, tests
CAD Technological Processes	Updated	Bachelor	4	Lectures, practicals, lab sessions, tests

& CALS				
Tools of Ecological Production	Updated	Bachelor	4	Lectures, e-learning, practicals
Human Resources Management	Updated	Bachelor	4	Lectures, e-learning, practicals
Production Management	Updated	Bachelor	6	Lectures, e-learning, practicals

Source: compiled by the authors.

All 6 courses were included in the study programme accreditation in 2018 and are an integral part of the current study plan.

To the question "Do you consider it necessary to study the disciplines listed below in the undergraduate programme?", all 16 respondents (100%) answered affirmatively for all 6 courses. This demonstrates full consensus from the academic community and employers regarding the relevance of the curriculum.

Respondents evaluated the degree to which each discipline contributes to the development of specific professional competencies. Table 5 presents the aggregated results.

Table 5. Respondents' agreement on specific professional competencies (% , N=16)

Professional Competency	Elec. Mach.	CAD Prod.	CAD Tech.	Eco. Prod.	HRM	Prod. Mgmt
Modelling and solving engineering, managerial and economic problems	75%	62.5%	68.75%	68.75%	68.75%	81.25%
Professional computer use	81.25%	75%	68.75%	50%	43.75%	62.5%
Understanding the concept of the industrial product	68.75%	68.75%	56.25%	50%	31.25%	56.25%
Understanding the concept of production systems	56.25%	50%	56.25%	50%	25%	56.25%
Knowledge of the technological manufacturing process concept	43.75%	37.5%	68.75%	50%	56.25%	68.75%
Experimental skills	31.25%	31.25%	37.5%	25%	12.5%	18.75%
Socio-humanistic, communication and linguistic skills	18.75%	12.5%	12.5%	12.5%	31.25%	31.25%
Economic-managerial skills	12.5%	12.5%	12.5%	18.75%	43.75%	37.5%
Skills in ecology and safety	18.75%	18.75%	25%	31.25%	18.75%	25%

Source: compiled by the authors.

Based on the data presented in the table, the following conclusions can be drawn regarding specific professional competencies:

- The competency with the highest average agreement is Modelling and solving engineering, managerial, and economic problems (average ~68%), followed by Professional computer use (~61%).

- The competencies related to Experimental skills (average ~29%) and Socio-humanistic competencies (average ~21%) recorded the lowest scores, indicating the need for increased emphasis on these dimensions.

- The Production Management course obtained the highest score for modelling competencies (81.25%), while Design of Electric Machines obtained the highest score for computer use (81.25%).

The general competencies of the study programme were evaluated separately, with results presented in Table.

Table 6. Agreement on general competencies (% , N=16)

General Competency	Elec. Mach.	CAD Prod.	CAD Tech.	Eco. Prod.	HRM	Prod. Mgmt
Personal and professional development	100%	87.5%	87.5%	81.25%	87.5%	81.25%
Social interaction	50%	37.5%	37.5%	56.25%	62.5%	50%
Responsibility	75%	68.75%	62.5%	68.75%	81.25%	68.75%
General Competency	Elec. Mach.	CAD Prod.	CAD Tech.	Eco. Prod.	HRM	Prod. Mgmt
Ability to learn and work independently	68.75%	62.5%	56.25%	62.5%	56.25%	50%
Study of specialised literature	68.75%	68.75%	75%	68.75%	62.5%	75%
Knowing and using specific language	50%	56.25%	50%	37.5%	31.25%	31.25%
Logical thinking	56.25%	50%	43.75%	43.75%	50%	50%
Explanation and interpretation	43.75%	25%	31.25%	50%	43.75%	31.25%
Creative-innovative behaviour	43.75%	43.75%	43.75%	31.25%	37.5%	43.75%
Critical and constructive thinking	50%	37.5%	25%	43.75%	37.5%	50%

Source: compiled by the authors.

- "Personal and professional development" recorded the highest average agreement (87.5%), with 100% agreement for the "Design of Electric Machines" course.
- "Responsibility" ranks second (average ~73%), reflecting the formative value of all courses.
- "Creative-innovative behaviour" (average ~41%) and "Critical and constructive thinking" (average ~39%) present potential for improvement.

Table 7. Preferred assessment methods by respondents (% , N=16)

Method	Elec. Mach.	CAD Prod.	CAD Tech.	Eco. Prod.	HRM	Prod. Mgmt
Tests	62.5%	68.75%	75%	75%	87.5%	87.5%
Laboratory work	75%	81.25%	81.25%	75%	50%	56.25%
Essays	6.25%	6.25%	6.25%	31.25%	37.5%	31.25%
Individual/group projects	68.75%	81.25%	68.75%	43.75%	50%	62.5%
Interdisciplinary projects	56.25%	56.25%	68.75%	50%	43.75%	50%

Source: compiled by the authors.

Based on the data presented in the table, tests (average ~73%) and laboratory work (average ~69%) are the most preferred assessment methods, reflecting the practical orientation of the programme. Individual/group projects (average ~63%) are also appreciated, particularly for CAD and Production Management courses. Essays (average ~18%) are the least preferred — the predominance of technical courses explains this tendency.

Table 8. Perceived importance of courses (% , N=16)

Course	Very important	Important	Don't know	Unimportant
Design of Electric Machines	50%	50%	0%	0%
CAD of Products	81.25%	12.5%	6.25%	0%
CAD Tech. Processes & CALS	68.75%	31.25%	0%	0%
Tools of Ecological Production	50%	50%	0%	0%
Human Resources Management	31.25%	62.5%	0%	0%
Production Management	62.5%	37.5%	0%	0%

Source: compiled by the authors.

All courses are evaluated as important or very important by 100% of respondents (with the exception of one respondent who indicated "Don't know" for CAD of products). The "CAD of Products in Machine Building" course recorded the highest percentage in the "Very important" section (81.25%).

University-Industry Partnership. The sustainability of engagement with enterprises is ensured by integrating them into all phases of the project, from curriculum definition to offering internships and support for bachelor's theses. Partners such as Drăxlmaier Automotive play a crucial role in validating competencies and providing an applied learning environment.

Resilience, Inclusion, and Social Impact in a Crisis Context. The DIGITRANS project has a pronounced social dimension, becoming an instrument of resilience in the face of challenges such as military conflict, migration, and social disparity. The capacity to maintain an active educational process through digital platforms is vital for preventing a "lost generation" of engineers. The DIGITRANS digital ecosystem offers learning opportunities for academic staff and students, allowing them to remain connected to the academic community. Furthermore, the impact extends to groups with reduced opportunities, facilitating access to elite technical education through online courses and remote laboratories that eliminate geographical and financial barriers.

Table 9. Social impact of the project

Target Group	Support Measures and Impact	Estimated Outcomes
Students (UA/MD)	Training in EU laboratories, mobilities, internships in industry.	72 students trained in EU laboratories.
Academic Staff	Teach-the-Teacher programmes, access to modern resources.	54 lecturers trained in EU; 144 in total.
Refugees Displaced Persons /	Access to DLE (Digital Learning Ecosystem) for continuity.	Integration into the remote educational process.
Enterprises	Access to qualified graduates; cooperation in research.	41 students in direct internships.

Source: compiled by the authors.

Quality Management and Long-Term Sustainability. The success of a curricular modernisation process of this magnitude depends on a robust quality assurance system. DIGITRANS has established a system of internal and external evaluation, monitored by the Erasmus+ National Offices in Ukraine and Moldova. Each partner has delegated a member to the Quality Assurance and Management Team (QAMT), responsible for evaluating deliverables, courses, and student feedback.

Project sustainability is guaranteed through several mechanisms:

- **Institutional Accreditation:** The new courses and programmes are integrated into the permanent structure of the universities, being accredited by the relevant national agencies.

- **Exploitation of the SREE Platform:** The hardware and software infrastructure will be maintained by the universities (particularly CPNU) after the end of Erasmus+ funding, serving as a resource for future generations.

- **Professional Networks:** The connections formed between the academic and industrial environment (reported as active in 63% of similar projects) provide the framework for future curricular updates.

- **Course Certification:** Modernisation concludes with the official certification of modules, allowing their delivery as part of Lifelong Learning for industry specialists.

Results of the Student Evaluation of Modernised Courses

This section synthesises the results of the course evaluation questionnaires completed by students participating in the DIGITRANS programme. Six courses were analysed, with a total of 67 respondents. The evaluation covered 11 quantitative criteria (scale 1–5) and three open-ended qualitative questions. Table 10 presents the respondent distribution per course, including gender, predominant age group, and academic status.

From the data presented in the table, it can be observed that the largest number of respondents was at the Production Management course, since this course is taught jointly to several student groups. Regarding the gender ratio, the Engineering field is predominantly attended by male students.

Table 10. Respondent profile per course

Course	Full Title	N	Gender	Age	Status
HRM	Human Resource Management	11	8M / 2F	16–21	Local
Production Mgmt	Production Management	17	8M / 9F	22–30	Local
Tools Ecolog.	Tools of Ecological Production	11	5M / 6F	22–30	Local
PACPICM	CAD of Products in Machine Building	11	9M / 2F	22–30	Local
PACPTCALST	CAD Technological Processes & CALS	6	4M / 2F	22–30	Local
PME	Electric Machines (PME)	11	8M / 2F	22–30	Local

Source: compiled by the authors.

Figure 1 presents the overall mean scores for each course (arithmetic mean of the 11 evaluation criteria). All courses obtained positive evaluations, with averages between 4.60 and 4.95 on a scale of 1 to 5.

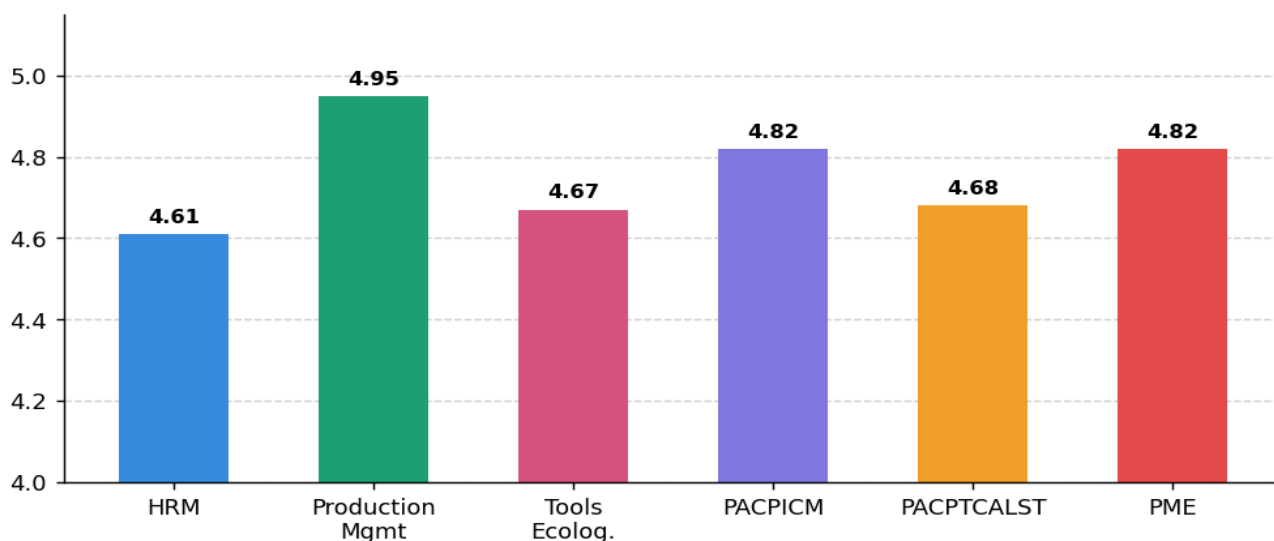


Figure 1. Overall mean scores per course

Source: compiled by the authors based on the survey

In order to detail the assessment of the courses according to the criteria established in the questionnaire, I will present in the following table the average scores for each evaluation criterion, broken down per course.

Table 11. Detailed scores by evaluation criterion

Criterion	HRM	Prod. Mgmt	Tools Eco.	PACPICM	PACPTCALST	PME
Topics covered	4.82	4.88	4.73	4.82	4.67	4.73
Well-structured course	4.64	5.00	4.64	4.82	4.67	4.82
Logical structure	4.64	5.00	4.55	4.91	4.67	4.82
Audiovisual materials	4.45	4.88	4.73	4.55	4.67	4.73
Creative thinking	4.64	4.94	4.73	4.73	4.67	4.82
Practical application	4.45	4.94	4.73	4.91	4.67	4.64
Criterion	HRM	Prod. Mgmt	Tools Eco.	PACPICM	PACPTCALST	PME
Theory/practice balance	4.73	4.88	4.55	4.82	4.67	4.73
Accessible literature	4.45	4.94	4.73	4.82	4.67	4.91
Lecturer's attitude	4.64	4.94	4.73	4.91	4.83	5.00
Sufficient time	4.64	5.00	4.73	4.82	4.67	4.91
Clear organisation	4.64	5.00	4.55	4.91	4.67	4.91
OVERALL AVERAGE	4.61	4.95	4.67	4.82	4.68	4.82

Source: compiled by the authors.

Analysis of the 67 questionnaires from the 6 DIGITRANS courses reveals a generally high level of student satisfaction. All courses obtained averages above 4.60 out of 5, indicating consistent quality of teaching and course organisation. The following observations can be made:

- Best-evaluated course: Production Management (average 4.95) — 4 criteria with a perfect score of 5.00.
- Criterion with the highest score: Lecturer's attitude — perfect score of 5.00 at the PME course, high averages across all courses.
- Criterion with the lowest scores: Audiovisual materials (4.45 at HRM) and logical structure (4.55 at Tools Ecological).
- Recurring trend in feedback: The desire for more practice versus theory — mentioned at HRM, Tools Ecological, and PME.
- Dominant student profile: Local students, aged 22–30 (exception: HRM: 16–21 years), with a mixed gender distribution.

DISCUSSION

The results obtained at Cahul State University (CSU) are consistent with the global trends documented in the specialist literature regarding the transformation of engineering education for Industry 4.0. The integration of e-learning in all modernised courses reflects the direction identified by Kucera et al. [9] regarding the need to combine physical laboratories with digital platforms and cloud applications. The use of the e-learning platform and virtual laboratories at CSU corresponds to the recommendations from the specialist literature regarding investments in hybrid laboratories.

The multi-actor approach adopted within the DIGITRANS project — involving students, academic staff, and student organisations in the course evaluation process — is in line with the theoretical perspectives on multi-actor coordination in curricular modernisation. The positive evaluations suggest that the curricular modernisation has achieved a satisfactory level of alignment between educational objectives, student needs, and industrial requirements.

The practical orientation of the modernised courses — with emphasis on real-world examples, startup-type projects, laboratory work, and concrete digital applications — corresponds to the recommendations of Malhaire and Fougères [7] regarding the importance of collaborative projects with industry, and of Caratozzolo et al. [2] regarding improving learning outcomes by combining structured and open-ended components.

The specific context of CSU presents several particularities that influence the curricular modernisation process and merit in-depth analysis.

Joint course organisation for students from different programmes (Engineering and Management in Machine Building, Engineering and Management in the Food Industry, Business and Administration) represents both a challenge and an opportunity. On the one hand, this organisation requires academic staff to adapt content and practical examples for audiences with different backgrounds. On the other hand, it facilitates the development of transversal competencies and an interdisciplinary perspective, essential for graduates who will work in complex and diverse organisational environments.

The sustainability dimension is explicitly integrated into the modernised curriculum through the "Tools of Ecological Production" course, which connects the principles of the circular economy with the technical and managerial requirements of modern engineering. This approach reflects the global trend of integrating the green dimension into the digital transformation of industry — the concept of a "twin transition" (green and digital) — which is increasingly recognised as a fundamental requirement for engineering graduates [16].

Industry collaboration represents a specific challenge for CSU, given the regional economic context. Although the "Production Management" course includes a startup-type project that simulates real business conditions, the consolidation of formal partnerships with local and regional enterprises remains a priority for the subsequent stages of the DIGITRANS project.

Technological infrastructure constitutes a recognised challenge in the context of universities in less developed regions. The use of the e-learning platform and virtual laboratories within the DIGITRANS project represents an important step in overcoming this challenge, providing students with access to modern digital tools regardless of the limitations of the physical infrastructure.

The research results generate several practical implications for continuing and extending the curricular modernisation process at CSU and in similar institutions in the region:

- Extending the practical and digital component. Lecturers' recommendations regarding extending the practical component, deeper integration of digital tools, and strengthening industry collaboration are consistent with the international trends documented in the specialist literature. Implementing these recommendations could further increase curriculum relevance and student satisfaction.
- Continuous updating of content. The accelerated dynamics of Industry 4.0 require continuous content updating mechanisms to ensure relevance vis-à-vis the most recent technological and industrial developments. Banciu and Feier [27] emphasise that curriculum adaptation is a continuous process, not a one-time intervention.
- Continuous professional development of academic staff. Effective implementation of Industry 4.0-oriented pedagogies requires continuous training of academic staff in areas such as digital tools, active teaching-learning methods, and industry collaboration. The DIGITRANS project provides a valuable framework for this training, but its long-term institutionalisation represents an important challenge.
- Systematic industry engagement. Consolidating partnerships with the business environment, to ensure curriculum relevance vis-à-vis the real requirements of the labour market, is a priority identified both in the specialist literature and in the recommendations of academic staff at CSU.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

This paper has provided a comprehensive analysis of the development of educational competencies for Industry 4.0, integrating perspectives from academic literature, the European policy approach, and complex results regarding the identification of students' competency training needs and students' own

opinions on the modernised courses and the digital methods integrated into them, following the implementation of the DIGITRANS project.

The curricular modernisation carried out at USCH Cahul under the aegis of the DIGITRANS project represents a significant step in transforming engineering education in the Republic of Moldova. The multi-actor audit highlighted that students are prepared to adopt Industry 4.0 tools, appreciating the balance between theory and practice. The results of the curricular modernization process and multi-stakeholder audit carried out within the DIGITRANS project highlight the need for a profound transformation of engineering education to meet the demands of Industry 4.0. Aligning skills is not a singular act, but a dynamic process that requires a symbiosis between technology, pedagogy and real socio-economic needs.

The main recommendations derived from the research include:

- Extending the use of the SREE (Sharing Remote Experiment Environment) infrastructure to allow remote access to high-performance laboratory equipment.
- Implementing interdisciplinary projects that combine mechanical design with data-driven process optimisation.
- Continuing the training of academic staff through "Teach-the-Teacher" programmes to keep pace with technological innovations.

The transformation initiated at Cahul provides a replicable model for other technical education institutions, contributing to the creation of a resilient and competitive workforce in the digital era.

Recommendations for policymakers include making curriculum structures more flexible to allow for rapid updates, continuing investment in teacher training, and creating national mechanisms to encourage public-private partnerships in technical education. The DIGITRANS project provides a replicable model of good practice, demonstrating that, through digital collaboration and innovation, universities in the region can become pillars of sustainable industrial transformation. The completion of this process will mark not only an academic victory, but a fundamental contribution to the future stability and prosperity of Ukraine and the Republic of Moldova within the European family.

ACKNOWLEDGEMENTS *The research was carried out within the project: ERASMUS+ „Digital transformation of HEIs education process in Ukraine and Moldova for sustainable engagement with enterprises”. Project No. 101127683 – "DIGITRANS".*

REFERENCES

- [1] C. R. Piazer, D. N. Resende, and C. T. Picinin "Education, Information, and Skills for Industry 4.0 in Portugal: Toward a Research Agenda," *Education for Information*, 2025. DOI: [10.1177/01678329251407903](https://doi.org/10.1177/01678329251407903)
- [2] M. Delgado-Prieto, A. F. Sobrino, L. Ruiz Soto, D. Romero et al., "Active Learning based Laboratory towards Engineering Education 4.0," in Proc. 24th IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), *IEEE*, 2019. DOI: [10.1109/ETFA.2019.8869509](https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869509)
- [3] I. Marinelli et al., 2023 Report on the State of the Digital Decade, *European Commission*, 2024. <https://digital-skills-jobs.europa.eu/en/latest/news/2023-report-state-digital-decade>
- [4] Eurostat, "Digital economy and society statistics — households and individuals," Statistics Explained, *European Commission*, 2025. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/33472.pdf>
- [5] N. Z. Muzulon, L. M. Resende, G. C. L. Leal, and J. Pontes, "Beyond Technical Skills: Competency Framework for Engineers in the Digital Transformation Era," *Societies*, vol. 15, no. 8, p. 217, 2025. DOI: [10.3390/soc15080217](https://doi.org/10.3390/soc15080217)
- [6] S. Saniuk, S. Grabowska, and W. Grebski, "Knowledge and Skills Development in the Context of the Fourth Industrial Revolution Technologies: Interviews of Experts from Pennsylvania State of the USA," *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2677, 2022. DOI: [10.3390/en15072677](https://doi.org/10.3390/en15072677)
- [7] N. Ada et al., "A framework for new workforce skills in the era of industry 4.0," *International Journal of Manpower*, vol. 42, no. 5, pp. 874–893, 2021.
- [8] R. D. Soliani, D. A. Oliveira, J. C. N. Pontes, and T. D. R. Drumond, "Professional training in Industry 4.0: a competency-based educational model," *Gestão & Produção*, vol. 32, e2225, 2025.
- [9] E. Kucera, O. Haffner, P. Drahos, R. Leskovský, and J. Cigánek, "Educational case studies for Pilot Engineer 4.0 programme: Monitoring and control of discrete-event systems using OPC UA and cloud applications," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8802, 2022. DOI: [10.3390/app12178802](https://doi.org/10.3390/app12178802)

- [10] J.-M. Malhaire and A.-J. Fougères, "Project-based learning for engineering students in the context of Industry 4.0: Application to automotive assembly system," *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, pp. 2971–2980, 2023. DOI: [10.1017/pds.2023.297](https://doi.org/10.1017/pds.2023.297)
- [11] A. Benis, S. A. Nelke, and M. Winokur, "Upgrading Industrial Engineering and Management curriculum to Industry 4.0," in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology (ICIT 2020), *IEEE*, 2020. DOI: [10.1109/ICIT45562.2020.9067243](https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067243)
- [12] S. Saniuk, D. Caganova, and A. Saniuk, "Knowledge and Skills of Industrial Employees and Managerial Staff for the Industry 4.0 Implementation," *Mobile Networks and Applications*, vol. 28, pp. 220–230, 2023 (online 2021). DOI: [10.1007/s11036-021-01788-4](https://doi.org/10.1007/s11036-021-01788-4)
- [13] A. Łupicka and K. Grzybowska, "Key managerial competencies for industry 4.0 – practitioners', researchers' and students' opinions," *Logistics and Transport*, vol. 3, no. 39, pp. 4–18, 2018. DOI: [10.26411/83-1734-2015-3-39-4-18](https://doi.org/10.26411/83-1734-2015-3-39-4-18)
- [14] E. Więcek-Janka, N. Chochółowska, and W. Zarówna, "Engineer 4.0 and Manager 4.0 Competencies in Polish Family Manufacturing Enterprises," *Management and Production Engineering Review*, vol. 16, no. 1, pp. 3–15, 2025. DOI: [10.24425/MPER.2025.153935](https://doi.org/10.24425/MPER.2025.153935)
- [15] F. T. Aghayev, G. A. Mammadova, and R. T. Melikova, "Trends and prospects for IT education in Industry 4.0," *Problems of Information Society*, vol. 13, no. 1, pp. 97–103, 2022. DOI: [10.25045/jpis.v13.i1.12](https://doi.org/10.25045/jpis.v13.i1.12)
- [16] A. Benis, L. Notarnicola, S. Bonomi, and F. Zerbetto, "Training the Next Industrial Engineers and Managers about Industry 4.0: a case study about challenges and opportunities in the COVID-19 Era," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 2905, 2021. DOI: [10.3390/s21092905](https://doi.org/10.3390/s21092905)
- [17] V. V. Martynov, A. A. Kataev, and T. N. Shusharina, "Information Technologies for Designing Professional Educational Programs of Engineering Training for Industry 4.0," in Proc. Int. Conf. Information Technologies in Business and Industry (INFORINO), *IEEE*, 2024. DOI: [10.1109/inforino60363.2024.10551987](https://doi.org/10.1109/inforino60363.2024.10551987)
- [18] A. Chakrabarti, S. Dutta, and S. K. Pal, "Preparing engineers for lifelong learning in the era of industry 4.0," in Proc. World Engineering Education Forum / Global Engineering Deans Council (WEEF/GEDC), *IEEE*, 2021. DOI: [10.1109/weef/gedc53299.2021.9657247](https://doi.org/10.1109/weef/gedc53299.2021.9657247)
- [19] M. Azofeifa, J. C. Solís, and L. G. Vargas-Hernández, "Future skills for Industry 4.0 integration and innovative learning for continuing engineering education," *Frontiers in Education*, vol. 9, p. 1412018, 2024. DOI: [10.3389/feduc.2024.1412018](https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1412018)
- [20] Y. Liu, S. Patacsil, and C. W. Lumen, "Advancing Engineering Education to Develop Industry 4.0 Skilled Workforce: Preparing Students for Industry 4.0," *International Journal on Engineering, Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2025. DOI: [10.46328/ijonest.5923](https://doi.org/10.46328/ijonest.5923)
- [21] B. Motyl, G. Baronio, S. Uberti, D. Speranza, and S. Filippi, "How will change the future engineers' skills in the Industry 4.0 framework? A questionnaire survey," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 1501–1509, 2017. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.282](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.282)
- [22] R. S. Rocha, L. A. de Santa-Eulalia, E. H. Tanabe et al., "Industrial engineer and Industry 4.0? Empirical evidence from the Brazilian context considering the relation between competences and technologies," *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, vol. 15, no. 1, pp. 1–18, 2025. DOI: [10.1108/heswbl-11-2023-0305](https://doi.org/10.1108/heswbl-11-2023-0305)
- [23] L. Walaszczyk, "Competences and Skills of SMEs for Industry 4.0 – Case Studies of Selected European Initiatives," *Optimum. Economic Studies*, vol. 4, no. 110, pp. 145–160, 2022. DOI: [10.15290/oes.2022.04.110.08](https://doi.org/10.15290/oes.2022.04.110.08)
- [24] European Commission, "Digital literacy in the EU: An overview," *data.europa.eu*, Dec. 2023. <https://data.europa.eu/en/publications/datastories/digital-literacy-eu-overview>
- [25] P. Caratozzolo, V. Lara-Prieto, C. Martinez-Leon, H. R. Siller, and J. Membrillo-Hernandez, "Design of a microprocessors and microcontrollers laboratory course addressing complex engineering problems and activities," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 30, no. 5, e70006, 2022. DOI: [10.1002/cae.70006](https://doi.org/10.1002/cae.70006)
- [26] A. Widyakusuma and R. R. Hakim, "Crafting engineers for tomorrow: Aligning education with industry to achieve sustainable development," *Interdisciplinary Journal and Humanity*, vol. 3, no. 11, 2024. DOI: [10.58631/injurity.v3i11.1308](https://doi.org/10.58631/injurity.v3i11.1308)
- [27] F. V. Banciu and A. Feier, "Aspects regarding skills and education related to Industry 4.0," *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 11014, 2021. DOI: [10.1051/matecconf/202134311014](https://doi.org/10.1051/matecconf/202134311014)

Liudmila ROȘCA-SADURSCHI, PhD in *Economic Sciences*, Associate professor of Department of Economic Sciences, Technical University of Moldova, "Bogdan Petriceicu Hasdeu" University Center of Cahul, Cahul, Republic of Moldova, e-mail: sadurschi.liudmila@usch.md, <http://orcid.org/0000-0003-1358-0019>

Liliana CECLU, PhD in *Technical Sciences*, Associate Professor, Dean of Faculty of Economics, Engineering and Applied Sciences, Technical University of Moldova, "Bogdan Petriceicu Hasdeu" University Center of Cahul, Cahul, Republic of Moldova, e-mail: ceclu.liliana@usch.md, <http://orcid.org/0000-0001-5500-7785>

Marina BUNEA, PhD in *Technical Sciences*, Associate professor of Department of Engineering and Applied Sciences, Technical University of Moldova, "Bogdan Petriceicu Hasdeu" University Center of Cahul, Cahul, Republic of Moldova, e-mail: bunea.marina@usch.md, <http://orcid.org/0000-0002-7792-6907>

Дата надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

<https://doi.org/10.36910/t64tm535>

Shynkaryk M., Kravets O.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

ENERGY LOSSES AND ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THERMOTECHNICAL SYSTEM OPERATION

The paper examines thermodynamic causes of energy losses in thermal power plants and internal combustion engines and their environmental impact. The aim is to assess efficiency limits of thermotechnical systems and determine the relationship between energy degradation and environmental consequences such as thermal pollution and air emissions. The methodology is based on thermodynamic analysis of energy conversion processes, evaluation of thermal efficiency (including Carnot limits), exergy losses, and assessment of emission levels according to EURO environmental standards and international statistical data.

The results show that the real efficiency of thermal power plants is typically 35–40%, meaning that up to 60–65% of fuel energy is dissipated into the environment as low-grade heat. This leads to thermal pollution of water bodies and air, increases cooling water demand, and indirectly raises fuel consumption and greenhouse gas emissions. It is demonstrated that thermodynamic constraints between heat source and sink define fundamental, unavoidable energy losses regardless of technological improvements.

For internal combustion engines, it is shown that despite modern emission reduction technologies, they remain a significant source of CO₂, NO_x, hydrocarbons, and particulate matter. Transition from EURO-2 to EURO-6 standards significantly reduces specific emissions per unit distance; however, the total environmental burden remains high due to the large scale of vehicle usage worldwide.

The study confirms a direct link between energy inefficiency and environmental impact, including greenhouse gas accumulation, deterioration of air quality, and thermal stress on aquatic ecosystems. Waste heat and harmful emissions are identified as interconnected results of irreversible thermodynamic processes.

Keywords: thermodynamic analysis, thermal power plants, internal combustion engines, energy losses, exergy, thermal pollution, harmful emissions.

INTRODUCTION

Environmental protection remains one of the most pressing challenges of the modern era. The intensive development of industry, transportation, and the energy sector is accompanied by increasing emissions of harmful substances into the atmosphere, water resources, and soils, which adversely affects ecosystem stability and public health. The consequences of these processes include global warming, climate change, depletion of natural resources, and a decline in biodiversity. Particular attention should be paid to the operation of thermotechnical installations, which are significant sources of greenhouse gases, toxic compounds, and thermal pollution. In this regard, improving the environmental safety and energy efficiency of thermotechnical equipment has become strategically important in the context of sustainable development.

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND PROBLEM STATEMENT

The operation of thermotechnical equipment is accompanied by a range of environmental issues associated with fuel combustion processes, energy conversion, and heat transfer [1]. During the operation of boilers, heat exchangers, internal combustion engines, and other units, emissions of carbon, nitrogen, and sulfur oxides, solid particulate matter, soot, and unburned hydrocarbons are released into the environment. These components contribute to atmospheric pollution, intensify the greenhouse effect, participate in the formation of acid precipitation, and negatively affect the sanitary and hygienic condition of surrounding areas [2].

An additional contributing factor is heat losses through flue gases, insufficient thermal insulation, and suboptimal operating regimes, which lead to excessive fuel consumption and an increase in anthropogenic pressure on the environment.

The reduction of the negative environmental impact of thermotechnical equipment can be achieved through the implementation of energy-efficient and environmentally oriented technological solutions. The main directions for improvement include the modernization of boilers and heat exchangers, the use of high-efficiency burner systems, and the application of alternative and low-carbon fuels, including biofuels, natural gas, and hydrogen-based mixtures. An important role is played by the installation of flue gas cleaning systems for the removal of dust, sulfur oxides, and nitrogen oxides, as well as the automation of combustion processes aimed at optimizing equipment operating regimes.

An additional effect is provided by the utilization of secondary energy resources, which enables the reduction of heat losses, decreases fuel consumption, and lowers the level of harmful emissions [3]. Consequently, the thermodynamic analysis of environmental aspects of thermotechnical equipment operation

represents an important scientific and applied task aimed at improving the efficiency of energy systems and minimizing their environmental impact [4].

AIM AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of this work is to perform a thermodynamic assessment of energy losses in thermal power plants and internal combustion engines and to determine their impact on the level of environmental load, taking into account current energy efficiency requirements and environmental standards.

To achieve this aim, the following objectives were addressed:

to analyze the thermodynamic limitations of the efficiency of thermal energy systems based on the thermal efficiency (Carnot efficiency);

to evaluate the magnitude of energy losses in thermal power plants and their contribution to thermal pollution of the environment;

to investigate the structure and volume of pollutant emissions from internal combustion engines considering current EURO environmental standards;

to formulate recommendations for improving energy efficiency and environmental safety of energy and transport systems.

RESULTS OF RESEARCH

1. Thermodynamic analysis of environmental challenges associated with thermotechnical equipment operation

The intensive development of industry, transport, and the energy sector requires an ever-increasing consumption of energy resources in the form of heat and electricity. These processes are accompanied by a continuous growth in emissions of harmful substances into the atmosphere, water bodies, and soils, leading to climate change, global warming, depletion of natural resources, and a reduction in biodiversity. According to the International Energy Agency, global energy-related CO₂ emissions in 2025 reached nearly 38.4 billion tonnes [1].

Among the significant sources of greenhouse gases and thermal pollution are thermotechnical installations. These include boiler units, internal combustion engines, gas turbines, steam power plants, industrial furnaces, drying equipment, heat exchangers, and other energy systems. The primary energy source for most of these installations is the chemical energy of fossil fuels, which is converted during combustion into thermal energy and subsequently into mechanical or electrical energy. The efficiency of these conversion processes largely determines fuel consumption levels and the magnitude of harmful emissions.

During the operation of thermotechnical equipment, emissions of carbon, nitrogen, and sulfur oxides, solid particulate matter, soot, and unburned hydrocarbons are released into the environment. These pollutants deteriorate air quality, contribute to acid rain formation, intensify the greenhouse effect, and negatively affect human health. According to IEA assessments, the power generation sector remains one of the largest global contributors to energy-related CO₂ emissions [2].

From a thermodynamic perspective, the primary cause of environmental losses is the imperfection of real energy conversion processes. A significant portion of heat is irreversibly lost with exhaust gases, cooling media, through insufficient thermal insulation, and due to irreversibilities in combustion, heat transfer, and friction processes. This leads to reduced efficiency of energy systems, increased fuel consumption, and higher specific emissions per unit of useful energy produced.

Exergy analysis is an important tool for evaluating such losses, as it allows the degree of thermodynamic imperfection of equipment to be determined, the main sources of irreversible energy losses to be identified, and directions for system modernization to be justified [3]. Unlike conventional energy balances, the exergy approach assesses not only the quantity of energy but also its ability to perform useful work.

The main approaches to reducing the environmental impact of thermotechnical equipment include improving system efficiency, optimizing combustion regimes, implementing advanced burner technologies, recovering secondary energy resources, utilizing flue gas heat recovery, enhancing thermal insulation, and automating process control. Additional benefits can be achieved through the transition to low-carbon energy sources such as natural gas, biofuels, hydrogen mixtures, and the use of electrified heating systems. According to IEA projections, the development of clean technologies already contributes to limiting the growth of global emissions despite increasing energy demand [1].

Thus, thermodynamic analysis of environmental challenges associated with thermotechnical equipment operation represents an important scientific and engineering task that integrates energy efficiency, resource conservation, and environmental safety objectives.

The main environmental challenges include thermal pollution and atmospheric pollution.

2. Thermal Pollution

Prior to the full-scale war, the total installed capacity of combined heat and power plants (CHPs) and thermal power plants (TPPs) in Ukraine was estimated at approximately 20 GW [4]. As a result of military actions, damage to generation facilities, and the loss of part of the energy infrastructure, the available capacity of thermal power generation has significantly decreased. According to open sources, the current available capacity of TPPs is about 5387 MW, while during peak load periods thermal generation has provided up to 90% of electricity production, compensating for the deficit in the power system [5].

For a quantitative assessment of the thermal impact of energy systems on the environment, it is appropriate to use the theoretical thermal efficiency, which defines the maximum possible efficiency of heat engines under idealized conditions of heat-to-work conversion. This parameter is fundamental in thermodynamic analysis and allows the estimation of inevitable energy losses that are dissipated into the environment in the form of thermal pollution [6]:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

where η is the theoretical thermal efficiency of energy systems;

T_1 is the temperature of the heat source, K;

T_2 is the temperature of the heat sink, K.

In thermodynamic analysis, the temperature levels T_1 and T_2 are key parameters for evaluating the limiting (ideal) efficiency of heat-to-work conversion. The difference between the heat source temperature and the heat sink temperature fundamentally determines the maximum theoretical thermal efficiency of the cycle.

The temperature T_1 is constrained by the thermal resistance of structural materials and the reliable operating conditions of boiler components under high heat loads, which for modern thermal power plants is approximately 800 K. The lower temperature T_2 , at which heat is rejected, is determined by environmental conditions and the capabilities of the cooling system and is typically assumed to be around 300 K, corresponding to average ambient conditions. In practical installations, heat rejection and steam condensation are mainly carried out using water from natural or technical water reservoirs.

From an environmental perspective, the existence of a finite temperature T_2 close to ambient conditions fundamentally limits the possibility of complete conversion of heat into useful work. According to the second law of thermodynamics, a portion of the supplied heat must inevitably be rejected to the environment, forming so-called irreversible thermal losses. In real thermotechnical systems, these losses manifest as thermal pollution of water bodies (through cooling systems), increased thermal loading of the atmosphere, and higher fuel consumption required to compensate for the reduced useful work output.

Thus, the smaller the temperature difference between T_1 and T_2 , the lower the theoretical efficiency limit of the cycle, and the greater the proportion of energy dissipated into the environment as low-grade heat. This directly links thermodynamic limitations of heat engine cycles with environmental losses, which appear as both thermal and associated chemical environmental impacts.

Using the above temperature values $T_1 = 800$ K and $T_2 = 300$ K, the theoretical thermal efficiency of energy systems (based on the ideal Carnot cycle) is determined as follows:

$$\eta = 1 - \frac{300}{800} = 0,625.$$

Thus, even under idealized conditions with no additional losses considered, the maximum theoretical efficiency of heat-to-work conversion is limited to 62.5%. Accordingly, the fraction of energy that cannot be converted into useful work and is inevitably rejected to the environment as heat amounts to 37.5%. This portion of energy forms so-called thermodynamically determined losses, which in real systems further increase due to irreversibilities in heat transfer, combustion, and mechanical friction processes, thereby intensifying the environmental burden of energy systems.

The real efficiency of modern thermal power plants (TPPs) is approximately 35–40%, meaning that 60–65% of the fuel's supplied thermal energy is not converted into electrical energy and is dissipated into the environment as heat fluxes. This indicates significant thermodynamic limitations in energy conversion processes and inefficient use of fuel resources, as approximately 2.5–3 times more fuel must be burned to produce the same amount of electrical power compared to idealized conditions.

At an installed thermal power capacity of approximately 5387 MW, total heat losses can be estimated at around 10,004 MW, which is irreversibly released into the environment through cooling systems, flue gases, and other heat transfer pathways. Thus, a substantial portion of chemical energy is transformed into low-grade heat, generating a significant thermal load on surrounding ecosystems.

The operation of TPPs is also associated with intensive water consumption, as water serves as the main working medium in condensation systems. For steam condensation in condensers, the required cooling water flow rate is approximately 500–530 times greater than the thermal effect of cooling, reflecting the low efficiency of heat utilization at the final stages of the cycle. Actual water consumption of condensing TPPs for compensating evaporation losses is about 0.1–0.2 m³/MWh, whereas water withdrawal from natural sources reaches 2–3 m³/MWh, resulting in significant excess thermal loading of aquatic environments.

At an installed capacity of 5387 MW, this corresponds to water abstraction from natural sources in the range of 10,774–16,161 m³/h, while the technically required consumption is only 539–1077 m³/h. The difference between these values is returned to the environment in the form of heated water, leading to local temperature increases in aquatic ecosystems, disruption of their hydrobiological balance, and the development of thermal pollution effects.

From a thermodynamic standpoint, these losses can be interpreted as exergy losses, i.e., a reduction in the ability of energy to perform useful work. A significant portion of the supplied energy in TPPs is converted into low-grade heat with temperatures close to the ambient environment, which, according to the second law of thermodynamics, is practically unavailable for further useful conversion. Thus, the environmental impacts of TPP operation are directly linked to fundamental thermodynamic limitations of energy cycles, and their reduction is only possible through improving the exergy efficiency of systems and utilizing secondary heat flows.

Waste cooling water from thermal power plants is typically discharged into natural water bodies with a temperature increase of 5–10 °C above baseline levels. This thermal load causes significant changes in aquatic ecosystem functioning, including accelerated eutrophication (water “blooming”), reduced dissolved oxygen concentration, and deterioration of living conditions for aquatic organisms, including fish and microorganisms. As a result, the natural equilibrium of aquatic ecosystems is disrupted, and their self-regulation capacity is reduced.

An additional environmental impact is associated with cooling systems such as cooling towers, where partial water evaporation occurs. In this case, warm and moisture-saturated air masses are released into the atmosphere, leading to local microclimatic changes, increased humidity, and additional thermal loading of surrounding territories.

The low thermodynamic efficiency of thermal power plants directly results in excessive fuel consumption, which in turn increases emissions of greenhouse gases and pollutants, including CO₂, SO₂, NO_x, and particulate matter. Thus, thermal inefficiency of energy systems is directly correlated with intensified global warming processes and deterioration of air quality.

From the perspective of environmental energy systems, an alternative to thermal power plants is the use of renewable and low-carbon energy sources characterized by minimal environmental impact and significantly reduced emissions of harmful substances. The main directions include solar energy, wind energy, and bioenergy, which enable electricity generation without large-scale fossil fuel combustion and, consequently, without substantial thermal and chemical pollution.

3. Environmental Pollution from Internal Combustion Engine Emissions

The fuel combustion temperature in internal combustion engines of various types ranges from 1800 to 2500 °C, which theoretically enables high thermal efficiency values of about 80–85%. However, under real operating conditions, a significant portion of heat is removed with exhaust gases, which leave the cylinder at temperatures of 500–700 °C, and additional losses occur due to friction and cooling systems. As a result, the actual efficiency of modern internal combustion engines is only 30–55% [4].

The main source of environmental pollution during engine operation is exhaust gases. As of March 19, 2024, there were 13.16 million motor vehicles in Ukraine, of which approximately 9.8 million were passenger cars, with an average vehicle age of 16.1 years [5]. Such a structure of the vehicle fleet represents an additional factor of increased environmental pressure.

During gasoline combustion in engines with outdated fuel injection systems, emission levels of pollutants can be significantly higher compared to modern engines. According to generalized emission factors for low Euro-class vehicles provided in the EMEP/EEA guidebook [6], elevated emissions of CO, unburned hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x), and particulate matter are typical, reflecting incomplete

combustion processes and the absence of effective exhaust gas after-treatment systems. Even modern vehicles equipped with emission control technologies remain a significant source of air pollutants.

On a global scale, the transport sector is one of the key contributors to greenhouse gas emissions. In the European Union, road transport accounts for approximately 35% of CO₂ emissions and about 20% of total greenhouse gas emissions, while in the United States this share reaches around 30%. For Ukraine, transport-related greenhouse gas emissions are estimated at 8–12% of the total national emissions [7]. Forecasts indicate that by 2026, global CO₂ emissions from internal combustion engines may increase by 25–44%, intensifying greenhouse effect risks and climate change processes. According to the United Nations, an increase of approximately 9% in global greenhouse gas emissions has been recorded over the last decade [7].

The European Union is actively implementing transport decarbonization policies aimed at significantly reducing greenhouse gas emissions from road transport by 2050 (by up to 60% compared to 1990 levels). A key technological measure is the widespread use of three-way catalytic converters, which simultaneously reduce CO, NO_x, and hydrocarbon emissions under stoichiometric air-fuel mixture conditions [8].

In addition to structural improvements of engines and exhaust gas treatment systems, an important approach to reducing environmental impact is the use of alternative fuels. Biofuels derived from renewable biomass sources and secondary organic resources represent a promising solution. In particular, biodiesel produced from vegetable oils and fat-containing waste is considered an effective alternative to conventional diesel fuel [9].

A promising feedstock is technical chicken fat obtained from fat-rich waste of poultry processing plants, including feathers, blood, offal, and meat-fat residues [10–11]. The cost of such raw material is approximately three times lower compared to vegetable oils, which increases its economic feasibility.

Biodiesel has several environmental advantages compared to conventional fuels: it is a renewable energy source, contains lower levels of sulfur and polycyclic aromatic hydrocarbons, and contributes to a reduction in total pollutant emissions. Additionally, it reduces the impact on the greenhouse effect, since during combustion it releases approximately the same amount of CO₂ that was absorbed by plants during growth, thereby partially closing the natural carbon cycle [9].

DISCUSSION OF RESULTS

Based on the performed analysis of the thermodynamic efficiency of thermotechnical equipment and the environmental impact of vehicles with internal combustion engines, a set of technical and organizational measures aimed at reducing emissions and improving energy efficiency can be formulated.

The primary direction is the improvement of the thermodynamic efficiency of thermal energy systems through the modernization of main equipment. In particular, the implementation of high-efficiency heat exchangers, the enhancement of burner systems, the optimization of combustion processes, and the use of advanced thermal insulation materials enable the reduction of heat losses and, consequently, a decrease in fuel consumption.

An important role is played by the introduction of waste heat recovery systems, including regenerative cycles and cogeneration units, which increase the overall fuel energy utilization efficiency and reduce the level of thermal pollution of the environment. Special attention should also be given to improving water cooling systems, in particular through the implementation of closed-loop or low-water consumption cycles, which reduce the thermal load on natural water bodies.

For internal combustion engines, a key direction is the reduction of exhaust gas toxicity through the implementation of modern after-treatment systems, including three-way catalytic converters, particulate filters, and selective catalytic reduction systems for nitrogen oxides. Additional benefits are achieved by maintaining an optimal stoichiometric air–fuel ratio and applying electronic engine control systems to regulate the combustion process.

A significant environmental potential lies in the gradual substitution of conventional fossil fuels with alternative energy carriers. The use of biofuels derived from plant-based feedstocks or organic waste materials (including fat-containing residues from the agro-industrial sector) makes it possible to reduce total greenhouse gas emissions and partially close the carbon cycle.

A separate strategic direction is the development of renewable energy sources such as solar, wind, and bioenergy, which enable electricity generation without large-scale fossil fuel combustion and, consequently, without significant emissions of pollutants and thermal discharges.

The comprehensive implementation of the above measures allows for simultaneous reduction of anthropogenic environmental impact, improvement of energy efficiency in heat supply and transport systems, and ensuring sustainable development of industrial and energy enterprises.

CONCLUSIONS

1. The operation of thermal power plants is accompanied by significant thermodynamic energy losses, which are dissipated into the environment in the form of low-grade heat. This leads to thermal pollution of water bodies and atmospheric air, deterioration of ecosystem conditions, and indirectly intensifies the greenhouse effect due to the need for additional fuel consumption to generate the required electrical power.

2. Fundamental limitations of thermodynamic cycles determine a low fraction of useful energy conversion, resulting in increased resource consumption and considerable environmental losses. From the perspective of sustainable energy development, the most promising approach is the integration of renewable energy sources into a balanced energy system with energy storage facilities, which reduces dependence on fossil fuels.

3. Internal combustion engines are a significant source of atmospheric pollution by carbon oxides, nitrogen oxides, hydrocarbons, and particulate matter. Their environmental impact can be reduced through the improvement of emission standards, the development of advanced exhaust gas after-treatment systems, and the use of alternative fuels, particularly biodiesel.

4. The application of energy-efficient heat exchanger designs, environmentally safe materials, and automated purification systems for process media contributes to reducing energy losses and anthropogenic pressure on the environment. This ensures higher overall energy efficiency of industrial systems and aligns with the principles of sustainable industrial development.

REFERENCES

1. International Energy Agency, *Global Energy Review 2026: CO₂ Emissions*. Paris, France: IEA, 2026. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/co2-emissions>. Accessed: Apr. 28, 2026.
2. International Energy Agency, *Electricity 2025: Emissions*. Paris, France: IEA, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-2025/emissions>. Accessed: Apr. 28, 2026.
3. I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2021.
4. M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
5. Ministry of Infrastructure of Ukraine, *Statistics of the Motor Vehicle Fleet of Ukraine 2024*. Kyiv, Ukraine, 2024.
6. European Environment Agency, *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories*. Copenhagen, Denmark: EEA, 2019. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>. Accessed: Apr. 28, 2026.
7. United Nations Environment Programme, *Emissions Gap Report 2024*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2024. [Online]. Available: <https://www.unep.org>. Accessed: Apr. 28, 2026.
8. European Commission, *The European Green Deal: Transport and Emissions Strategy*. Brussels, Belgium, 2024. [Online]. Available: <https://commission.europa.eu>. Accessed: Apr. 28, 2026.
9. A. Demirbas, "Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines," *Energy Conversion and Management*, 2019.
10. X. Zhang *et al.*, "Waste animal fats as biodiesel feedstock," *Renewable Energy*, 2021.
11. T. Krawczyk, "Biodiesel from animal fats – advantages and limitations," *Fuel Processing Technology*, 2020.

Шинкарик М.М., Кравець О.І. Енергетичні втрати та екологічні наслідки роботи теплотехнічних систем

Розглянуто термодинамічні причини формування екологічного навантаження, пов'язаного з функціонуванням теплових електростанцій та двигунів внутрішнього згоряння. Мета дослідження полягає в комплексному оцінюванні енергетичних втрат теплотехнічних систем і визначенні їхнього впливу на довкілля з позицій другого закону термодинаміки та сучасних екологічних вимог. Методика реалізації базується на аналітичному дослідженні термічного коефіцієнта корисної дії енергетичних установок, оцінюванні ексергетичних втрат у процесах перетворення енергії, аналізі

нормативних емісійних показників стандартів Еуро-2–Еуро-6, а також використанні статистичних даних щодо енергетичного сектору та автомобільного транспорту.

Результати дослідження показали, що реальний коефіцієнт корисної дії теплових електростанцій перебуває в межах 35–40 %, що зумовлює втрати до 60–65 % первинної енергії палива у вигляді низькопотенційної теплоти, яка відводиться у навколишнє середовище. Це спричиняє теплове забруднення водних об'єктів і атмосферного повітря, а також додаткове споживання природних ресурсів. Встановлено, що теплова потужність, яка розсіюється у довкілля за наявних генерувальних потужностей, перевищує 10 ГВт, тоді як водоспоживання систем охолодження залишається екологічно значущим чинником впливу.

Для двигунів внутрішнього згоряння підтверджено суттєве скорочення питомих викидів за рахунок послідовного впровадження стандартів Еуро, однак транспортний сектор і надалі залишається вагомим джерелом викидів CO₂, NO_x, незгорілих вуглеводнів та твердих частинок. Показано прямий взаємозв'язок між енергетичною неефективністю та зростанням техногенного навантаження на довкілля. Висновки свідчать, що ключовими напрямками мінімізації негативного впливу є підвищення енергоефективності теплотехнічного обладнання, утилізація вторинної теплоти, модернізація систем очищення викидів, розвиток відновлюваної енергетики та впровадження альтернативних палив, зокрема біопалива.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, теплові електростанції, двигуни внутрішнього згоряння, енергетичні втрати, ексергія, теплове забруднення, викиди шкідливих речовин.

ШИНКАРИК Марія Миколаївна кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри обладнання харчових технологій Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. E-mail: maria.shynkaryk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3489-9803>

КРАВЕЦЬ Олег Ігорович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обладнання харчових технологій Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. E-mail: kravetsoleg05@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3309-9962>.

Mariia SHYNKARYK PhD in Engineering, Professor of the Department of Food Technologies Equipment, Ternopil Ivan Puluj National Technical University. E-mail: maria.shynkaryk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3489-9803>.

Oleh KRAVETS PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Food Technologies Equipment, Ternopil Ivan Puluj National Technical University. E-mail: kravetsoleg05@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3309-9962>.

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

<https://doi.org/10.36910/ekz0vb53>

Siora O.V., Yurchenko Yu.V., Kurylo V.A., Bondarieva V.I., Bernatskyi A.V.
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

DEVELOPMENT AND TESTING OF AUXILIARY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR LASER WELDING OF THIN-WALLED T-JOINTS IN VARIOUS SPATIAL POSITIONS

This study examines ways to improve the efficiency of laser welding of T-joints by developing specialized welding equipment. It is shown that, despite a significant body of research on the properties of welded joints, the issue of ensuring welding process stability through equipment design remains understudied. The aim of this work is to create and experimentally test technological equipment for laser welding of T-lap joints in various spatial positions. The developed equipment includes a clamp for fixing samples and a laboratory stand with a two-axis laser head movement system. The clamp design ensures precise alignment of the joint elements, adjustable fixing of the edge, and uniform supply of shielding gas from both sides of the edge. The laboratory stand enables controlled movement along the X and Z axes using servo drives and ball-screw drives, which allows for high positioning accuracy and process reproducibility. The ability to change the spatial position of the weld by tilting the work frame is provided. Experimental studies were conducted on the welding of T-joints made of austenitic and austenitic-ferritic stainless steels using an Nd:YAG laser with a power of up to 4.4 kW. Microstructural analysis revealed the formation of a fine-grained austenitic weld structure with a negligible content of δ -ferrite and a narrow heat-affected zone. It was established that the weld geometry is stable, and the structural characteristics are uniform throughout the welded joint. The results of mechanical tests confirmed the high strength of the welded joints. The results obtained demonstrate the effectiveness of the developed process equipment and the possibility of its use for forming high-quality T-joint welds in various spatial positions that meet the requirements of DSTU EN ISO 13919-1:2019 and are characterized by the highest quality level «B».

Keywords: laser welding, thin-walled components, T-joints, stainless steels, spatial positions, welding challenges, equipment development.

INTRODUCTION

The current stage of industrial production is characterized by the widespread adoption of high-tech material processing methods, among which laser technologies play a particularly significant role. One of the most promising areas is laser welding, which is actively used in mechanical engineering, as well as in the aviation, automotive, shipbuilding, energy, and electronics industries. This is due to a number of significant advantages, including high energy concentration, a minimal heat-affected zone, high process speed, the possibility of automation, and the assurance of consistent weld quality [1–3]. In addition, laser welding allows for effective processing of thin-walled materials and complex product geometries, which is crucial for modern manufacturing [4].

The use of laser welding contributes to increased labor productivity, reduced consumption of materials and energy resources, and improved performance characteristics of products. Due to the contactless nature of the process and the ability to precisely control laser radiation parameters, high repeatability of results is ensured, and the influence of the human factor is minimized [5]. Studies [6, 7] have shown that laser welding produces welded joints with high mechanical properties and minimal defects in materials such as corrosion-resistant steels and titanium alloys.

Of special interest is the laser welding of thin-walled T-joints, which are widely used in structures such as stiffening panels, heat exchange equipment, vehicle components, and power plant components. Such joints are characterized by increased requirements for assembly accuracy, joint geometry, and welding process stability. As shown in the study [8], even minor deviations in the relative position of the elements or the presence of a gap can significantly affect the formation of the weld, its geometry, and strength characteristics.

This necessitates the development and use of special auxiliary technological equipment that allows parts to be fixed in a specified position, ensures uniform clamping, and minimizes deformation during welding.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

An analysis of current scientific literature in the field of laser welding indicates that a significant portion of research focuses on the study of the formation processes of welded joints, including T-joints, primarily in the lower spatial position, which is the most technologically stable and convenient for implementation. In such studies, the primary focus is on the influence of laser radiation energy parameters (power, welding speed, focal position), as well as heat removal conditions, on the formation of weld geometry, microstructure, and mechanical properties of the joints. It has been established that the vast

majority of studies concern laser welding of thick-walled materials, primarily structures made of carbon and low-alloy steels, including various types of joints, in particular T-joints, which are widely used in heavy machinery and building structures. For such materials, the patterns of deep penetration formation, the stability of the “keyhole” mode, and the mechanical properties of joints have been studied in detail [9–11]. At the same time, the issue of laser welding of thin-walled elements, especially those made of stainless steels, particularly T-joints, has been addressed in a significantly smaller number of studies and lacks a sufficient level of generalization [12, 13].

In this regard, a pressing scientific and technical challenge is the development of effective auxiliary technological equipment for laser welding of thin-walled T-joints made of stainless steel in various spatial orientations. Such equipment must ensure precise mutual positioning of the welded elements, the absence or minimization of gaps, the limitation of deformations, and the reproducibility of the geometric parameters of the welded joint. Solving this problem will improve the quality of welded joints, reduce the number of defects, and expand the scope of laser welding applications.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of this work is to develop and test auxiliary welding equipment for welding thin-walled T-joints in various spatial positions, as well as to optimize welding parameters to produce defect-free welded joints.

RESEARCH RESULTS

One of the most technically challenging T-joint welds is a T-lap joint where there is no access to the joint edge (Fig. 1).

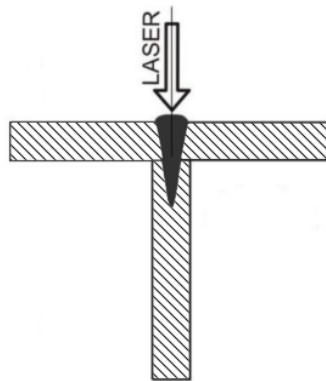


Fig. 1. Scheme of a T-lap joint

During welding such joints in the lower spatial position, a number of specific problems arise:

1. ensuring precise alignment of the laser beam along the joint edge;
2. melted metal flowing out of the weld pool;
3. forming the weld geometry (upper bead and fillets);
4. effective heat dissipation in the welding zone;
5. ensuring stable gas shielding of the welding zone.

Accordingly, to address these issues, the authors of the article developed and created additional technological equipment for laser welding of T-lap joints in various spatial positions. The equipment consists of a clamp for T-joints, as well as a laboratory stand that allows for laser welding in various spatial positions.

The clamp, designed for welding T-joints (Fig. 2), consists of two housings made of 10-mm-thick 20 grade steel. The first housing is rigidly mounted on the plate, while the second is movable and can be displaced relative to the first in the same plane to secure the web of the T-joint. The range of this movement is 0...11 mm. The movable housing is moved using bolts mounted on a bracket on its side along the longer side. The dimensions of the housings allow for the installation of shelves and edges with dimensions up to 500×200 mm.

The clamp design allows for laser welding T-lap joints that reaches the edge from the side of the shelf. Shielding gas is supplied to the back side of the shelf on both sides of the edge along the entire length of the welded joint.

The housings of the technological equipment used to manufacture test specimens of T-joint welds are hollow inside to ensure a uniform flow of shielding gas (Fig. 2). Gas is supplied to each of the two housings, providing protection for the weld on both sides of the web beneath the flange. The groove for the supply of shielding gas is formed by 5×5 mm bevels on the edges of the housings at a 45° angle. There are

39 outlet holes with a diameter of 2 mm on these bevels. The surfaces of the clamp's fixed and movable housings, against which the specimen shelf rests, are located in the same plane, with a maximum deviation from flatness not exceeding ± 0.1 mm. The T-joint edge is installed between the bodies in the central part of the shelf at a 90° angle to it. The shelf with welded specimens is secured to the bodies using clamping plates. Secure contact between the edge and the shelf is ensured by the movable body using a clamping plate and bolts.

The 40-mm-thick clamping plates are bevelled at a 60° angle toward the weld, ensuring unobstructed movement of the gas shielding device over the weld pool. The internal volume of each chamber ($90 \times 16 \times 480$ mm) is 619 cm^3 . The overall dimensions of the clamp for welding T-joint specimens are $625 \times 255 \times 167$ mm, and its weight is approximately 30 kg.

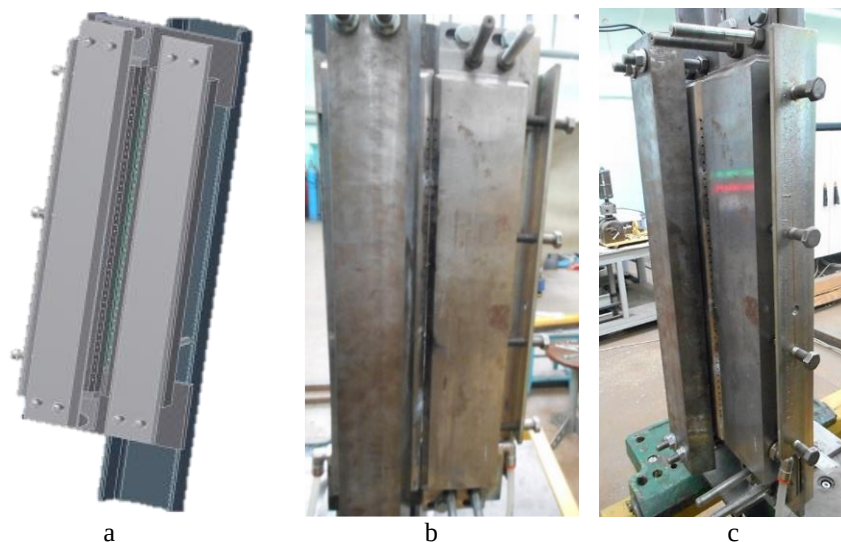


Fig. 2. Clamp for welding T-joints: (a) 3-D model, (b) front view, (c) side view

The laboratory test stand is designed for the development and testing of laser welding technologies for T-joint welds in steels and alloys with thicknesses ranging from 0.3 to 20.0 mm. It consists of an integrated system of interconnected electromechanical and electronic components, assemblies, and a process laser. The welding head moves along the X and Z axes. The stand consists of the following main components: a two-axis manipulator, a movable platform, a platform for mounting a clamp, as well as control and automation units (Fig. 3).

The test stand design incorporates two linear servo drives based on synchronous AC motors. The voltage applied to the motor windings is controlled by servo amplifiers (frequency converters), in which position feedback is provided by incremental encoders. The encoder shafts are rigidly connected to the motor shafts. The rated rotational speed of the motors is 50 rev/s.

In both servo drives, rotational motion is converted to linear motion using ball-screw drives with a lead of 10 mm/rev. The position and speed of both servo drives are controlled via external pulse control using the «Step/Dir» discrete interface. The «Dir» input is used to set the direction of the carriage's movement. The servo drives are configured such that when a single pulse is received at the «Step» input, the carriage moves 10 μm in the corresponding direction depending on the signal at the «Dir» input.

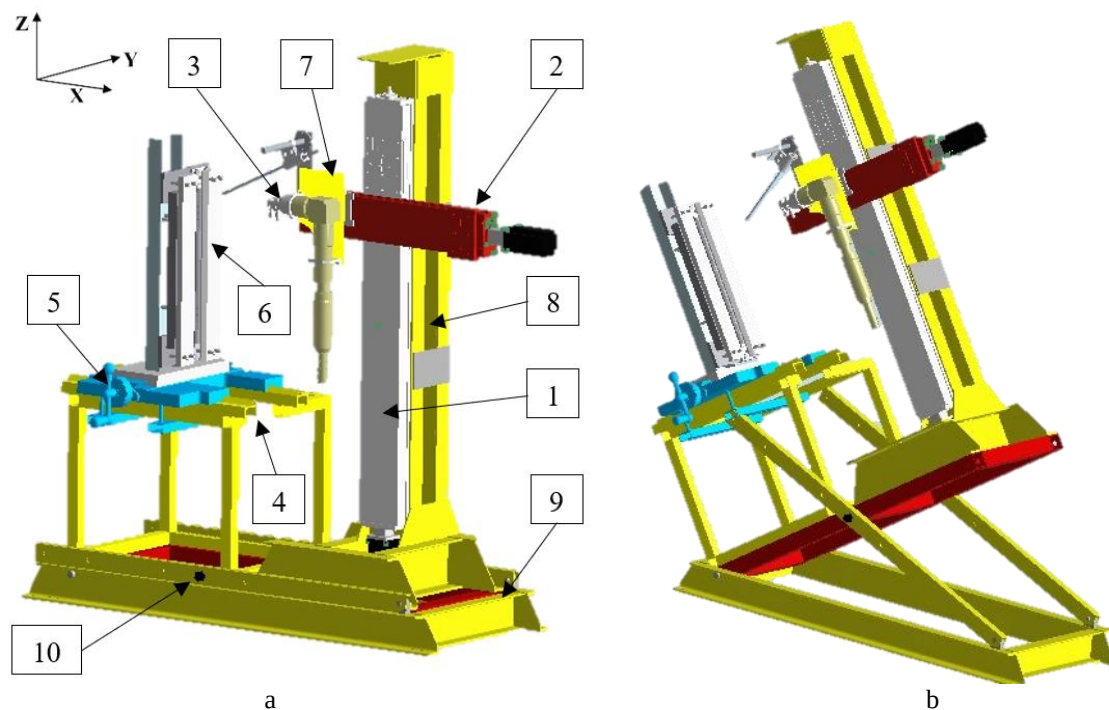


Fig. 3. Model of the laboratory test bench (a): 1 – linear motion module along the Z-axis, 2 – linear motion module along the X-axis, 3 – welding head, 4 – clamp for fixing welding specimens, 5 – platform for moving the clamp in the XY plane, 6 – clamp with a specimen, 7 – bracket for mounting the welding head, 8 – column, 9 – fixed frame, 10 – rotary hinge mechanism; (b) Model of the laboratory stand in an inclined position

Structurally, the linear modules are mechanically connected to one another and form a three-link kinematic chain. The first link is a fixed frame that serves as the base of the entire system (item 9 in Fig. 3a) and measures 1620×650 mm; it is fabricated by welding No. 12 steel channels. The second and third links are represented by linear modules (items 1 and 2 in Fig. 3a).

The second section is connected to the first via a rotary hinge mechanism (item 10 in Fig. 3a), which allows it to be tilted from the vertical position within a range of 0° to 90° (Fig. 3b).

The inclination of the movable frame is adjusted in discrete steps at angles of 30°, 45°, 60°, and 90°, and the position is secured by side plates and M20 bolts. The side plates are mounted on the axes of the fixed frame housings. Currently, the inclination mechanism is not equipped with a servo drive, so the angle is adjusted manually. The linear module of this link is mounted on a 1650 mm high column (position 8 in Fig. 3, a), made of No. 16 steel channels.

The third link (item 2 in Fig. 3a) is rigidly mounted on the carriage of the second link. The laser head (item 3 in Fig. 3a) is mounted on the carriage of the third link using brackets (item 7 in Fig. 3a).

In the initial position, the second link is oriented vertically (Fig. 3a). In this configuration, each linear module moves the laser head along the corresponding coordinate of the Cartesian coordinate system: the second link is responsible for movement along the Z-axis, and the third link is responsible for movement along the X-axis. The travel range is 540 mm along the X-axis and 1170 mm along the Z-axis.

A personal computer running the Linux operating system is used to implement contour control. To enhance reliability, a modified real-time operating system kernel is employed, ensuring guaranteed execution times for input/output operations. The software for contour motion control allows configuring the CNC system to calculate motion trajectories and control electrical automation. The built-in interpolator enables programming of motions along linear, circular, and cubic spline segments of trajectories in two- and three-dimensional coordinate systems. Support for various interfaces, including a serial port and USB, is provided for interaction with external equipment.

The functional capabilities of the developed manufacturing equipment were evaluated during experimental studies of the laser welding process for T-joints made of stainless steels. The T-joint was fabricated from two grades of steel: the edge was made of 10Kh18N10T austenitic steel, and the shelf was made of 12Kh21N5T austenitic-ferritic steel. The work was performed using a solid-state Nd:YAG laser «DY044» manufactured by ROFIN-SINAR (Germany) with a radiation wavelength $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ and a

maximum laser power $P = 4.4$ kW. Fig. 4 shows a laboratory setup for laser welding in various spatial positions.



Fig. 4. Laboratory setup for laser welding in various spatial orientations (a); (b) the process of welding T-joints

Research has shown that the best results in terms of process stability and the formation of dense welds can be achieved using the following parameters: 4.4 kW, 250 Hz, 75/25 duty cycle; -1 mm defocusing; and a welding speed of 4000 mm/min for the vertical position. In all cases, welding is recommended to be performed with argon supplied as a shielding gas at different flow rates to specific areas: 30 L/min to the weld pool; 5 L/min from below the shelf (total for both sides of the edge) to the end of the weld pool, to protect the cooling metal – 20 L/min.

Microstructural studies of the T-joint weld have shown that the weld structure is cast and dispersed (Fig. 5), consisting of fine crystallites oriented in the heat-dissipation direction.

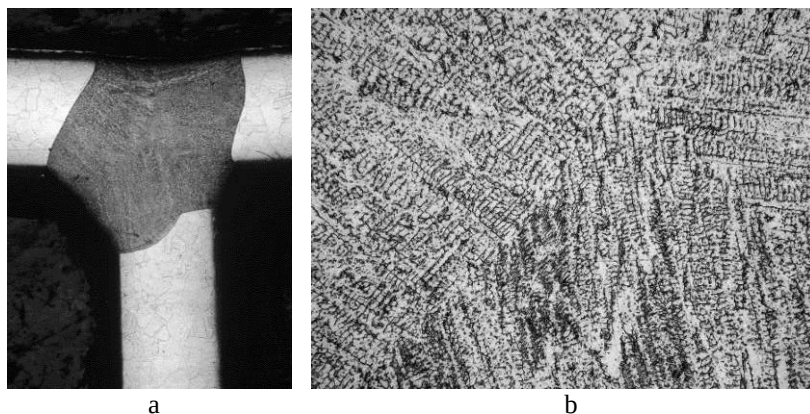


Fig. 5. T-joint weld: (a) general view, $\times 30$; (b) microstructure in the central zone of the weld, $\times 400$

The size of the crystallites in the center of the weld and near the fusion line differs only slightly (Fig. 6). In the center of the weld, the width of the crystallites ranges from 2.5 to 7.5 μm ; near the fusion line, it ranges from 2.5 to 3.5 μm , occasionally reaching 5.0 μm (shelf). The microstructure of the weld is austenitic, with a small (up to 1.5%) amount of δ -ferrite.

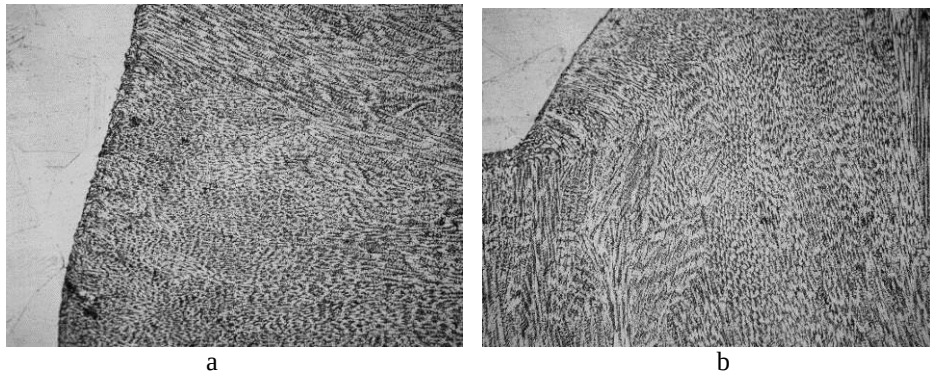


Fig. 6. Microstructure of a welded joint near the fusion line, $\times 200$: (a) from the shelf side; (b) from the edge side

The heat-affected zone is practically non-existent on both the rib and flange sides (Fig. 7). The microstructure consists of large austenite grains. The difference between the microstructure of the heat-affected zone and that of the base metal lies in the reduced etchability of the grain boundaries on both the rib and flange sides. The grain size of the shelf HAZ corresponds mainly to No. 3, rarely to No. 4 according to GOST 5639-82, while in the edge HAZ, the grain size is mainly No. 4. The width of the shelf HAZ is approximately 700–800 μm , and the width of the edge HAZ is 750 μm . The hardness of the metal in the shelf HAZ is HV 0.1–2640, 2740, 2740, 2800 MPa, and in the rib HAZ, HV 0.1–2450, 2740, 2330, 2280 MPa.

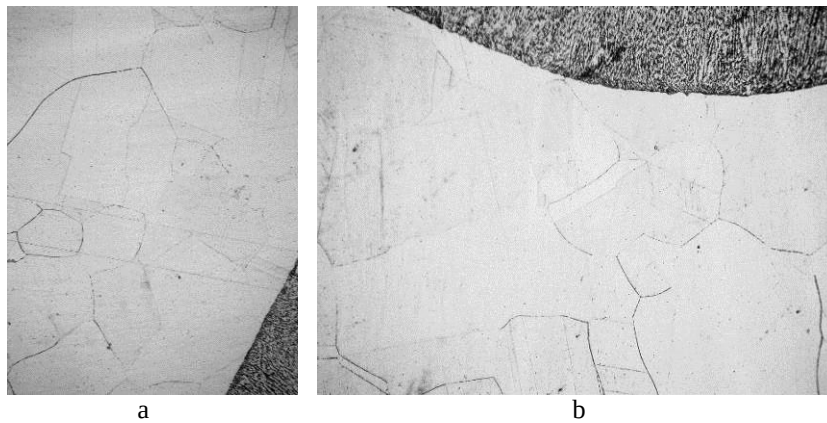


Fig. 7. Microstructure of the heat-affected zone, $\times 200$: (a) shelf; (b) edge

The microstructure of the base metal of the shelf at a distance of more than 5 mm from the fusion line consists of austenitic grains with twins, indicating metal deformation and the precipitation of a small amount of an excess phase along the grain boundaries (Fig. 7, a, b); this is likely δ -ferrite, since the base metal contains up to 0.3% of the α -phase. The amount of precipitates along the grain boundaries increases with distance from the fusion line (Fig. 7, c).

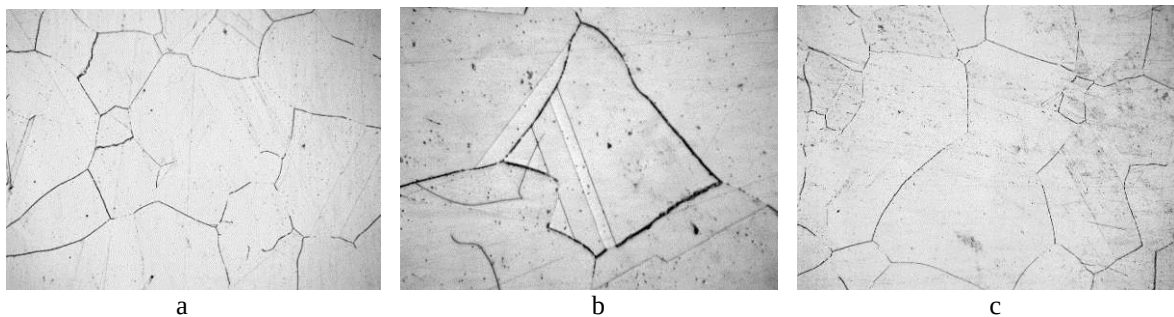


Fig. 7. Microstructure: (a) shelf metal, $\times 200$; (b) precipitation along the grain boundaries of the austenite in the base metal of the shelf, $\times 500$; (c) edge metal, $\times 200$

The strength characteristics of the T-joint weld were also determined. Five 20-mm-wide specimens were cut from the tested single T-joint weld specimen. Static tensile tests of the welded specimens were

conducted on an MTS 318.25 servo-hydraulic testing machine in accordance with GOST 6996-66 on three specimens cut from the welded specimen under study. The purpose of the test was to determine the load required to fracture the specimen under static tensile loading and to identify the location of the fracture in the T-joint weld. Conditions for the static tensile tests: gauge length 40 mm, loading rate 10 mm/min, ambient temperature 20 °C.

Table 1 below presents the results of static tensile and low-cycle fatigue tests on single T-joint specimens.

Table 1. Results of static tensile and low-cycle fatigue tests on a single T-joint weld.

№	Width, mm	Thickness, mm	Breaking force P_{max} , N	UTS, MPa	Notes Location of the damage
1	20,0	1,1/1,2	15737	656	Along the edge
2	20,0	1,1/1,2	15586	649	Along the edge
3	20,0	1,1/1,2	14574	662	Along the seam (shelve)
4*	20,0	1,1/1,2	-		Low-cycle fatigue test with a load of 7,500 N – 50 load cycles at a frequency of 1 Hz
4	20,0	1,1/1,2	15993	667	Along the edge
5*	20,0	1,1/1,2	-		Low-cycle fatigue test with a load of 7,500 N – 50 load cycles at a frequency of 1 Hz
5	20,0	1,1/1,2	14221	592	The specimen deformed and slipped (stretched) out of the equipment

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

An analysis of recent scientific publications shows that most studies in the field of laser welding focus primarily on investigating the properties of T-joint welds – their strength, microstructure, durability, and failure mechanisms – but much less frequently address the development of specialized process equipment for their fabrication [12, 13]. In contrast to this approach, the present work focuses primarily on the creation of process equipment followed by experimental verification of its functional capabilities. The developed clamp ensures reliable fixation of the T-joint elements and allows for the formation of a T-lap joints from the shelve side with simultaneous supply of shielding gas from both sides of the edge. Design features, in particular hollow housings and a system of holes for uniform gas distribution, contribute to effective protection of the weld pool and minimization of oxidation. The laboratory test bench, in turn, enables laser welding in various spatial positions thanks to the presence of a two-axis manipulator and the ability to adjust the working frame's tilt angle from 0 to 90 degrees. The use of servo drives with ball-screw drives and discrete «Step/Dir» control ensures high positioning accuracy. The experimental results obtained confirm the effectiveness of the developed equipment. Microstructural analysis revealed the formation of a fine-grained austenitic weld structure with a negligible amount of δ -ferrite, which is characteristic of the laser welding process. The HAZ width is approximately 700–800 μm , indicating a localized thermal effect. The results of mechanical tests demonstrate a sufficiently high level of strength in the welded joints, with fracture occurring both along the edge and along the weld, indicating the comparability of their strength characteristics. Thus, compared to most studies, where the main focus is on the properties of welded joints, this work demonstrates the feasibility and effectiveness of developing specialized process equipment.

CONCLUSIONS

This work has developed and manufactured auxiliary technological equipment consisting of a clamp and a laboratory test bench with a two-axis motion system. The proposed equipment enables laser welding of T-lap joints in various spatial positions, which expands the technological capabilities of the process and increases the flexibility of its application. The design solutions implemented in the clamp, in particular the system for uniform shielding gas supply and ensuring high precision of specimen alignment, contribute to the stability of the welded joint formation. The results of microstructural and mechanical studies indicate the formation of high-quality T-joint welds with a fine-grained weld structure, a limited heat-affected zone, and sufficient strength. It has been established that the resulting welded joints comply with the requirements of DSTU EN ISO 13919-1:2019 and are characterized by the highest quality level «B».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Юрченко Ю., Сіора О., Лукашенко В., Гардер Д., Соколовський М., Бернацький А. Дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на мікроструктуру стикових зварних з'єднань корозійностійкої сталі AISI 304. ВІСНИК Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2025, №12(298), С. 47–55. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-47-55>
- 2.Юрченко Ю. В., Сучек О. М., Курило В. А., Сіора О. В., Соколовський М. В., Бернацький А. В. Розробка лабораторного устаткування для виготовлення плоских та циліндричних зразків з тонколистового матеріалу з використанням технології лазерного зварювання. Вісник Херсонського Національного Технічного Університету. 2024. № 1(88). С. 156–160. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.20>
- 3.Bernatskyi A. V., Siora O. V., Yurchenko Yu. V., Lukashenko V. A., Harder D. A. (2025). Development of the technology of laser welding of a thin-walled girth joint for the manufacture of the housing structure of the sensor. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2025. Vol. 1. No 24. P. 6–15. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1704>
- 4.Юрченко, Ю., Сіора, О., Соколовський, М., Гардер, Д., Бернацький, А. (2025). Лазерне зварювання тонкостінних виробів з віссю обертання типу труба-штуцер виготовлених з корозійностійких високолегованих сталей. ВІСНИК СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ Імені Володимира Даля. 2025. №1 (287). С. 12–20. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-12-20>
- 5.Kaierle S., Dahmen M., Gündükkurt O. Eco-efficiency of laser welding applications. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*. 2011. Vol. 8065. 80650T. <https://doi.org/10.1117/12.888794>
- 6.Yurchenko, Y., Siora, O., Sokolovskyi, M., Hryn, A., Frolov, M., & Bernatskyi, A. Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT*. 2025. Vol. 2, no. 25. P. 87-96. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914>
- 7.Wu Y., Mao Y., Fu L., Qin D., Xiao X. Dual laser-beam synchronous self-fusion welding of Ti–6Al–4V titanium alloys T-joints based on prefabricated welding materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 17. P. 2560–2576. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.014>
- 8.Meng W., Li Z., Huang J., Wu Y., Cao R. Effect of gap on plasma and molten pool dynamics during laser lap welding for T-joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69, no. 5–8. P. 1105–1112. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5095-6>
- 9.Xu K., Cui H., Li F. Connection Mechanism of Molten Pool during Laser Transmission Welding of T-Joint with Minor Gap Presence. *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 10. 1823. <https://doi.org/10.3390/ma11101823>
- 10.Mittelstädt C., Seefeld T., Woizeschke P., Vollertsen F. Laser welding of hidden T-joints with lateral beam oscillation. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 74. P. 456–460. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.151>
- 11.Cai Y., Yang Q., Sun D., Zhu J., Wu Y. Monitoring of deviation status of incident laser beam during CO2 laser welding processes for I-core sandwich construction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 77, no. 1–4. P. 305–320. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6421-3>
- 12.Lambertsen S. H., Damkilde L., Kristensen A. S., Pedersen R. R. Estimation of fatigue life of laser welded AISI304 stainless steel T-Joint based on experiments and recommendations in design codes. *World Journal of Mechanics*. 2013. Vol. 03, no. 03. P. 178–183. <https://doi.org/10.4236/wjm.2013.33017>
- 13.Piekarska W., Saternus Z., Sapieta M., Kopas P. The influence of joining technique on the deformation of laser welded T-joints. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 254. 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402011>

REFERENCES

- 1.Yurchenko, Yu., Siora, O., Lukashenko, V., Harder, D., Sokolovskyi, M., & Bernatskyi, A. (2026). Doslidzhennia vplyvu parametriv lazernoho zvaryuvannia na mikrostrukturu stykovykh zvarnykh ziednan koroziiinostiikoi stali AISI 304. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 12(298), 47–55. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-47-55>
- 2.Yurchenko, Yu. V., Suchek, O. M., Kurylo, V. A., Siora, O. V., Sokolovskyi, M. V., & Bernatskyi, A. V. (2024). Rozrobka laboratornoho ustatkuvannia dlia vyhotovlennia plaskykh ta tsylindrychnykh zrazkiv

z tonkolystovoho materialu z vykorystanniam tekhnolohii lazernoho zvariuvannia. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu*, 1(88), 156–160. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.20>

3. Bernatskyi A. V., Siora O. V., Yurchenko Yu. V., Lukashenko V. A., Harder D. A. (2025). Development of the technology of laser welding of a thin-walled girth joint for the manufacture of the housing structure of the sensor. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2025. Vol. 1. No 24. P. 6–15. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1704>

4. Yurchenko, Yu., Siora, O., Sokolovskyi, M., Harder, D., & Bernatskyi, A. (2025). Lazerne zvariuvannia tonkostinnykh vyrobiv z vissiu obertannia typu truba-shtutser vyhotovlenykh z koroziinostiikykh vysokolehovanykh stalei. *VISNYK SKhIDNOUKRAINSKOHO NATsIONALNOHO UNIVERSYTETU Imeni Volodymyra Dalia*, 1 (287), 12–20. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-12-20>

5. Kaierle, S., Dahmen, M., & Gdkkurt, O. (2011). Eco-efficiency of laser welding applications. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 8065, 80650T. <https://doi.org/10.1117/12.888794>

6. Yurchenko, Y., Siora, O., Sokolovskyi, M., Hryn, A., Frolov, M., & Bernatskyi, A. (2025). Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT*, 2(25), 87–96. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914>

7. Wu, Y., Mao, Y., Fu, L., Qin, D., & Xiao, X. (2022). Dual laser-beam synchronous self-fusion welding of Ti–6Al–4V titanium alloys T-joints based on prefabricated welding materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2560–2576. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.014>

8. Meng, W., Li, Z., Huang, J., Wu, Y., & Cao, R. (2013). Effect of gap on plasma and molten pool dynamics during laser lap welding for T-joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5–8), 1105–1112. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5095-6>

9. Xu, K., Cui, H., & Li, F. (2018). Connection Mechanism of Molten Pool during Laser Transmission Welding of T-Joint with Minor Gap Presence. *Materials*, 11(10), 1823. <https://doi.org/10.3390/ma11101823>

10. Mittelstdt, C., Seefeld, T., Woizeschke, P., & Vollertsen, F. (2018). Laser welding of hidden T-joints with lateral beam oscillation. *Procedia CIRP*, 74, 456–460. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.151>

11. Cai, Y., Yang, Q., Sun, D., Zhu, J., & Wu, Y. (2014). Monitoring of deviation status of incident laser beam during CO2 laser welding processes for I-core sandwich construction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1–4), 305–320. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6421-3>

12. Lambertsen, S. H., Damkilde, L., Kristensen, A. S., & Pedersen, R. R. (2013). Estimation of fatigue life of laser welded AISI304 stainless steel T-Joint based on experiments and recommendations in design codes. *World Journal of Mechanics*, 03(03), 178–183. <https://doi.org/10.4236/wjm.2013.33017>

13. Piekarska, W., Saternus, Z., Sapieta, M., & Kopas, P. (2019). The influence of joining technique on the deformation of laser welded T-joints. *MATEC Web of Conferences*, 254, 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402011>

Сіора О.В., Юрченко Ю.В., Курило В.А., Бондарєва В.І., Бернацький А.В. Розроблення та апробація допоміжного технологічного оснащення для лазерного зварювання тонкостінних таврових з'єднань у різних просторових положеннях.

У роботі розглянуто питання підвищення ефективності лазерного зварювання таврових з'єднань шляхом розроблення спеціалізованого технологічного оснащення. Показано, що, незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених властивостям зварних з'єднань, питання забезпечення стабільності процесу зварювання за рахунок конструктивних рішень оснащення залишаються недостатньо вивченими. Метою роботи є створення та експериментальна перевірка технологічного оснащення для лазерного зварювання таврових з'єднань прорізним швом у різних просторових положеннях. Розроблене оснащення включає струбцину для фіксації зразків і лабораторний стенд із двокоординатною системою переміщення лазерної головки. Конструкція струбцини забезпечує точне базування елементів з'єднання, регульовану фіксацію ребра та рівномірну подачу захисного газу з обох сторін ребра. Лабораторний стенд реалізує кероване переміщення за координатами X і Z із використанням сервоприводів та кульково-гвинтових передач, що дозволяє досягти високої точності позиціонування і відтворюваності процесу. Передбачена

можливість зміни просторового положення зварювання за рахунок нахилу робочої рами. Експериментальні дослідження виконано при зварюванні таврових з'єднань із корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів із використанням Nd:YAG-лазера потужністю до 4,4 кВт. Проведений мікроструктурний аналіз показав формування дрібнодисперсної аустенітної структури шва з незначним вмістом δ -фериту та вузькою зоною термічного впливу. Встановлено, що геометрія шва є стабільною, а структурні характеристики рівномірні у всьому зварному з'єднанні. Результати механічних випробувань підтвердили високий рівень міцності зварних з'єднань. Отримані результати свідчать про ефективність розробленого технологічного оснащення та можливість його використання для формування якісних таврових зварних з'єднань у різних просторових положеннях, які відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 13919-1:2019 та характеризуються найвищим рівнем якості «В».

Ключові слова: лазерне зварювання, тонкостінні вироби, таврові з'єднання, корозійностійкі сталі, просторові положення, проблеми зварювання, розробка оснащення.

СІОРА Олександр Васильович, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: siora@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

ЮРЧЕНКО Юрій Вікторович, аспірант, провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона Національної академії наук України, e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

КУРИЛО Володимир Андрійович, завідувач групи відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: vladkurilo@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0790-9404>.

БОНДАРЄВА Валентина Іванівна, заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: laser-77@online.ua, <http://orcid.org/0000-0002-4745-0995>.

БЕРНАЦЬКИЙ Артемій Володимирович, кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

Oleksandr SIORA, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: siora@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

Yurii YURCHENKO, Post graduate student, Senior Engineer of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

Volodymyr KURYLO, Group Leader of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: vladkurilo@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0790-9404>.

Valentyna BONDARIEVA, Deputy Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: laser-77@online.ua, <http://orcid.org/0000-0002-4745-0995>.

Artemii BERNATSKYI, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

Дата надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

<https://doi.org/10.36910/x351f729>

Tsopa V.¹, Cheberyachko S.², Deryugin O.², Litvinova Ya.², Klymenko I.²
Private Higher Educational Institution «International Management Institute (MIM-Kyiv)»¹
Dnipro University of Technology²

IMPROVEMENT OF THE LOGISTICS RISK MANAGEMENT PROCESS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE ENTERPRISES

Supply chains of critical infrastructure enterprises under contemporary conditions are characterized by high complexity, digitalization, and an increasing level of hybrid threats, which necessitates a transition from reactive to proactive approaches to logistics risk management. The purpose of this article is to improve the logistics risk management process within supply chain security management systems of critical infrastructure facilities through the implementation of the requirements of the international standard ISO 28000:2022.

The study employs systems analysis to examine supply chains as complex, interconnected ecosystems, as well as methods of mathematical and logical modeling to formalize risk assessment as a function of the probability of threat realization and the severity of its consequences. An improved logistics risk management process is proposed, based on the integration of the requirements of ISO 28000:2022, ISO 31000:2018, and ISO/IEC 27001:2022, with mandatory consideration of risks associated with the use of artificial intelligence in accordance with ISO/IEC 42001.

The improved process includes context definition and supply chain mapping using artificial intelligence tools; identification of assets and sources of threats with consideration of AI models and datasets; vulnerability analysis and assessment of incident probability; consequence analysis taking into account ethical and social AI risks; scenario simulation; development of security plans and risk treatment; as well as continuous system improvement considering the evolution of digital technologies. Practical implementation of the proposed approach is aimed at enhancing the resilience of critical infrastructure supply chains under conditions of dynamic risks and accelerated digitalization.

Keywords: ISO 28000, critical infrastructure, logistics risk management, supply chain resilience, integrated management systems, cyber-physical convergence, infrastructure decentralization, business continuity.

INTRODUCTION

In the contemporary, highly interconnected and globalized macroeconomic system, supply chains function as the fundamental circulatory system of any modern state. They ensure the continuity of production processes, the provision of basic social services, and the stable functioning of society as a whole. Critical infrastructure enterprises including the energy, transport, healthcare, and food sectors, as well as telecommunications and water supply, are in a state of tense, almost existential dependence on the reliability and uninterrupted operation of their logistics networks [1]. The growing complexity of these networks, currently characterized by deep technological and geographical interdependence, along with exposure to multifaceted and often unpredictable risks, necessitates an urgent shift from fragmented, reactive security measures to a highly integrated, proactive, and holistic approach to corporate governance [2].

Disruptions in global and local supply chains caused by geopolitical conflicts, large-scale cyberattacks, destructive natural disasters, industrial accidents, or pandemics are capable of triggering so-called cascading effects [1]. The phenomenon of cascading effects lies in the fact that disruption of even the smallest node in a logistics network inevitably leads to a domino effect, resulting in the shutdown of critical services at national or even transnational levels [3]. In this context, modern logistics management goes far beyond the traditional paradigm of physical asset protection and transforms into a complex strategic initiative aimed at ensuring continuous operational resilience of enterprises [4]. Achieving such resilience requires the development of multilevel strategies that take into account the interests of all stakeholders, from raw material suppliers to end users of critical services.

Accordingly, a pressing scientific and practical problem is the development and implementation of effective logistics risk management within supply chain security management systems of critical infrastructure facilities through the systematic implementation of the requirements of the international standard ISO 28000:2022 “Security and resilience – Security management systems for the supply chain – Requirements with guidance for use.” Implementation of this standard makes it possible to transition from reactive to proactive risk management, ensure the integration of security processes across all links of the logistics chain, and achieve compliance with resilience and security requirements of critical infrastructure facilities under contemporary challenges.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

To build a supply chain resilience architecture, a family of international ISO 28000 standards has been developed, providing a comprehensive and scientifically grounded framework for identifying vulnerabilities

and for establishing, implementing, operating, reviewing, maintaining, and continuously improving supply chain security management systems [6]. Implementation of this system enables organizations not only to protect their assets from malicious actions, but also to develop flexible mechanisms for adapting to crisis conditions while maintaining operational profitability and preserving trust from society and the state [7].

Supply chain management has undergone unprecedented digitalization. Modern logistics processes of critical infrastructure are governed by complex software systems, cloud computing, and artificial intelligence (AI) algorithms used for dynamic routing of transport flows, intelligent demand forecasting, and automated customs clearance [8]. This technological evolution has created an entirely new class of logistics risks driven by the phenomenon of cyber-physical convergence, whereby virtual attacks on information systems are instantly materialized in the form of physical disruptions on transport corridors or in energy networks [9].

For critical infrastructure enterprises, logistics risk management is further complicated by the introduction of new, stringent European regulatory frameworks, including the NIS2 Directive (on a common high level of cybersecurity), the CER Directive (on the resilience of critical entities), and the European Cyber Resilience Act (CRA) [10]. As traditional physical security standards often prove to be “blind” to algorithmic threats, contemporary research proposes comprehensive multi-stage models for managing supply chain security and AI-related risks. Applying the logic of ISO 28000, strict supplier tiering is introduced, based not on the financial volume of contracts but exclusively on the criticality of contractors and their ability to trigger cascading impacts on essential services (for example, a regional blackout caused by a failure in the software of a transformer supplier) [2].

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The purpose of the study is to improve the logistics risk management process within supply chain security management systems of critical infrastructure facilities through the implementation of the requirements of ISO 28000:2022.

The study employs a combination of general scientific and specialized methods, including systems analysis to examine supply chains of critical infrastructure as complex, interconnected ecosystems, as well as mathematical and logical modeling to formalize risk assessment as a function of the probability of threat realization and the severity of its consequences.

RESEARCH RESULTS

Effective and comprehensive logistics risk management requires a deep understanding of the entire ecosystem of related standards. Although ISO 28000 is the core regulatory document that establishes direct certification requirements, it is organically supported by a set of auxiliary guidelines (Table 1), each of which performs a specific function in building a resilient enterprise.

Table 1. ISO 28000 Family of Standards: Requirements and Guidelines

Standard	Title and Scope	Current Status and Functional Role in the Management Architecture
ISO 28000:2022	Security and resilience – Security management systems for the supply chain – Requirements	Active. This is the core standard establishing fundamental requirements for the Supply Chain Security Management System (SCSMS) applicable to the entire organization, including all links of its supply chain [7].
ISO 28001:2007	Supply chain security management systems – Best practices for implementation, assessments, and plans	Active. Provides a detailed step-by-step methodology for risk assessment, development of comprehensive security plans, and achievement of compliance with the strict criteria of the Authorized Economic Operator (AEO) [11].
ISO 28002:2011	Development of resilience in the supply chain – Requirements with guidance for use	Withdrawn (repealed in 2024). Despite its formal withdrawal, its fundamental principles have been organically integrated into ISO 28000:2022, and the concepts of organizational resilience remain fully relevant for practical application during audits and tenders [12].
ISO 28003:2007	Requirements for bodies providing audit and certification of supply chain security management systems	Active. This standard ensures standardized approaches to external auditing, thereby enhancing global trust in ISO 28000 certification through regulation of auditor competence [10].
ISO	Guidelines on the	Active. The standard consists of several parts, including general

28004:2007	implementation of ISO 28000	principles (Part 1) and specific guidance for adapting requirements for small and medium-sized seaports (Part 2), other enterprises (Part 3), and integration with ISO 28001 (Part 4) [12].

The full strategic potential of implementing ISO 28000:2022 can be realized only when it is deeply harmonized with other corporate management systems. Modern global supply chains, characterized by high dynamism, require the establishment of Integrated Management Systems (IMS). The implementation of the IMS approach enables organizations to avoid duplication of bureaucratic processes, optimize resource utilization, and break down operational “silos” in which different departments (security, quality, environmental management) operate in isolation from one another [3].

The specific nature of critical infrastructure operations requires simultaneous consideration of multiple risk vectors. For example, integrating the requirements of ISO 28000 with those of ISO 9001 (quality management systems) ensures not only continuity of product deliveries but also guarantees the preservation of product quality characteristics during transportation, which is particularly critical for pharmaceutical logistics and food transport [3]. The combined application of ISO 14001 (environmental management) and ISO 45001 (occupational health and safety management) is essential to ensure the safe transportation and storage of hazardous goods (e.g., water treatment chemicals or fuels for the energy sector), while simultaneously protecting personnel and the environment from potential leaks or acts of sabotage [13].

Of particular strategic importance for critical infrastructure enterprises is the deep synchronization of ISO 28000 processes with the requirements of ISO 31000 (risk management) and ISO 22301 (business continuity). The new edition of ISO 28000 (notably Clause 4) directly includes recommendations for implementing eight security management principles that are conceptually aligned with and derived from the fundamental principles of ISO 31000 [5]. At the same time, Clause 8 of ISO 28000, which governs the development of risk prevention strategies, procedures, and plans, demonstrates full consistency with the business continuity requirements set out in ISO 22301 [3]. This deeply integrated approach enables critical infrastructure enterprises not only to establish fortified lines of defense for protecting physical assets, but also to develop highly resilient and viable disaster management strategies. As a result, organizations can remain operationally capable and economically sustainable even under the pressure of the most severe conditions, such as large-scale armed conflicts or global pandemics [14].

At the core of the practical implementation of ISO 28000 and the related ISO 28001 guidance lies a strictly formalized and structured process for assessing supply chain security risks. The methodology of the standard does not allow reliance on intuition; instead, it requires mathematical and logical justification. Within this framework, risk is conceptually defined as a mathematical function of the probability of realization of a specific threat and the severity of its potential consequences [15]:

$$R = P(T/V) \cdot C \quad (1)$$

where R denotes the level of risk; $P(T/V)$ represents the probability of realization of threat T , taking into account the existing system vulnerability V ; C denotes the severity of consequences resulting from the realization of this threat.

According to the detailed methodology outlined in ISO 28001, the risk management process is cyclical and consists of eight mandatory stages, each of which is accompanied by the preparation of appropriate documentation [11]. At the first stage, the scope is defined and the supply chain is mapped. This makes it possible to clearly delineate the boundaries of the security management system, identify all participants in the chain (suppliers, carriers, warehouse operators, customs brokers, and end recipients), and visualize all material, information, and financial flows between them.

At the second stage, assets and sources of threats are identified. A comprehensive register of physical assets (vehicles, warehouses), information assets (customer databases, routing documents), personnel, and supporting infrastructure is compiled. In parallel, a threat catalogue is developed, ranging from traditional natural hazards to hybrid attacks, terrorism, and organized crime [16].

At the third stage, vulnerability analysis and incident probability assessment are performed. These procedures are based on internal supply chain security audits aimed at identifying weaknesses in the existing control architecture [17]. Each vulnerability is correlated with the set of threats to calculate the probability parameter.

The fourth stage involves consequence analysis, which determines the potential scale of the destructive impact of an incident on business process continuity, financial stability, brand reputation, and – most critically for critical infrastructure – risks to human life and health [17].

At the fifth stage, a security plan is developed and risks are directly treated. Based on a prioritization matrix, management decides for each threat whether to avoid the risk (e.g., rerouting to bypass a hazardous area), mitigate it (through countermeasures such as enhanced video surveillance or cybersecurity), transfer it (by insuring cargo or outsourcing transportation to a certified contractor), or accept it if protection costs exceed potential losses [18].

As the risk management process is cyclical, the fifth stage is followed by implementation, monitoring, effectiveness assessment, and continual improvement, ensuring full closure of the cycle in accordance with the ISO 28001 methodology. At the sixth stage, approved countermeasures (route changes, strengthened physical security, cybersecurity measures, personnel training, etc.) are integrated into daily supply chain operations.

At the seventh stage, the effectiveness of countermeasures and the overall security process is evaluated and monitored. In the event of deviations or changes in the external environment (emerging threats, supply chain modifications, regulatory changes), corrective and preventive actions are activated, with particular attention to the protection of security-related information and response to actual incidents.

At the eighth stage (continuation/repetition of the process), the cycle restarts from the first stage: the scope is reviewed, supply chain mapping is updated, and a new risk assessment iteration is initiated. In this way, the principle of continual improvement embedded in the PDCA (Plan–Do–Check–Act) model is implemented, forming the basis of the supply chain security management system in accordance with ISO 28001.

To enhance the effectiveness of supply chain security management systems of critical infrastructure facilities, an improved logistics risk management process is proposed through the implementation of the requirements of ISO 28000:2022, with integration of the principles of ISO 31000:2018 and ISO/IEC 27001:2022, as well as mandatory management of artificial intelligence risks in accordance with ISO/IEC 42001:2023. The process retains an eight-stage structure with a mandatory element of communication and consultation at all stages, as well as explicit consideration of information assets and AI systems.

At the first stage, in addition to defining the scope and mapping the supply chain, the organizational context is analyzed in accordance with ISO 31000:2018 (Clause 6.3), using AI tools, particularly Graph Neural Networks (GNNs) – to automatically identify hidden dependencies within the supply chain. Consequently, this stage also includes a preliminary assessment of AI-related risks (data inaccuracy, bias, information leakage) in accordance with ISO/IEC 27001:2022 and ISO/IEC 42001:2023.

At the second stage, in addition to identifying assets and sources of threats and compiling a comprehensive register of physical assets (vehicles, warehouses), information assets (customer databases, routing documents), personnel, and supporting infrastructure, an extended threat catalogue is developed. This catalogue ranges from traditional natural hazards to hybrid attacks, terrorism, and organized crime, with mandatory consideration of specific AI-related threats (model inversion, supply-chain attacks on AI service providers). Identification is carried out using AI tools, including Large Language Models (LLMs) for NLP analysis, in accordance with ISO/IEC 27001:2022 (Clause 6.1.2) and ISO/IEC 42001:2023.

At the third stage, in addition to vulnerability analysis and incident probability assessment based on internal supply chain security audits, AI is used to forecast the likelihood of hazardous events. Simultaneously, AI-related risks are assessed in accordance with ISO 31000:2018 (Risk Analysis), ISO/IEC 27001:2022, and ISO/IEC 42001:2023.

At the fourth stage, alongside consequence analysis, impacts on information security (including AI model data leakage) and ethical and social risks of AI application are assessed. AI is also used to simulate incident consequences in accordance with ISO 31000:2018 (Risk Evaluation) and ISO/IEC 42001:2023.

At the fifth stage, in addition to developing security plans and direct risk treatment, AI is applied to validate the justification and effectiveness of specific countermeasures. For AI-related threats, countermeasures from Annex A of ISO/IEC 27001:2022 (supplier controls, specific contractual arrangements) are applied, taking into account the requirements of ISO/IEC 42001:2023.

At the sixth stage, alongside the implementation of countermeasures, AI is used for personnel training in the safe use of technologies, testing model robustness against attacks, and integrating KPIs for AI controls (ISO/IEC 27001:2022, Annex A.6.3; ISO/IEC 42001:2023).

At the seventh stage, in addition to evaluating the effectiveness of countermeasures and monitoring, AI is applied for real-time monitoring. When deviations are detected, corrective actions are activated and

documented within the information security management system in accordance with ISO 31000:2018, ISO/IEC 27001:2022 (Clause 9), and ISO/IEC 42001:2023.

At the eighth stage, in addition to repeating the process from the first stage as part of continual improvement, the evolution of AI technologies, emergence of new threats, and changes in the external environment are considered in accordance with ISO 31000:2018 (Clause 6.6), ISO/IEC 27001:2022 (Clause 10), and ISO/IEC 42001:2023, ensuring full closure of the PDCA cycle within a unified integrated management system.

Table 2 presents the differences between the traditional and the proposed logistics risk management approaches.

It should be noted that at the third stage enterprises face specific machine-learning-related threats that require dedicated response tools. Such threats include:

1. Data poisoning – malicious, covert modification of training datasets used by logistics AI, leading over time to distorted forecasts of port terminal load or required pharmaceutical inventory levels.
2. Model drift – natural or induced degradation of algorithm accuracy due to changes in real-world conditions, which is particularly critical in wartime, when established logistics routes are disrupted while algorithms continue to generate outdated solutions.
3. Adversarial manipulation – generation of specific digital noise to deceive computer vision systems responsible for automated access control of vehicles to critical infrastructure facilities.

Table 2. Differences between traditional and proposed logistics risk management approaches

Stage	Traditional Management (ISO 28001)	Proposed Enhanced Management (Integration of ISO 31000, ISO/IEC 27001, and AI)
1	Definition of scope and supply chain mapping	Additionally: consideration of organizational context (ISO 31000, Clause 6.3); use of AI for automated supply chain mapping with preliminary assessment of AI-related risks (ISO/IEC 27001)
2	Identification of assets and sources of threats; register of physical and information assets and threat catalogue	Additionally: inclusion of AI models and datasets in the asset register; expansion of the threat catalogue to include specific AI-related threats
3	Vulnerability analysis and probability assessment based on internal audits	Additionally: use of AI for anomaly detection and scenario modeling; mandatory assessment of AI risks (ISO 31000 + ISO/IEC 27001 + ISO/IEC 42001)
4	Consequence analysis of incidents (business, finance, reputation, human life)	Additionally: assessment of information security impacts and ethical/social AI risks; use of AI for consequence simulation (ISO 31000, Risk Evaluation)
5	Development of security plans and risk treatment (avoid, mitigate, transfer, accept)	Additionally: AI-specific countermeasures from Annex A of ISO/IEC 27001; full integration with ISO 31000 (Risk Treatment)
6	Implementation of countermeasures with defined timelines and responsibilities	Additionally: integration of AI systems with KPIs; mandatory personnel training and testing of AI models for robustness (ISO/IEC 27001, Annex A.6.3)
7	Effectiveness evaluation and monitoring (audits, KPIs, incident analysis)	Additionally: use of AI for real-time monitoring; documentation within the information security management system (ISO 31000 + ISO/IEC 27001, Clause 9)
8	Cycle repetition (continual improvement)	Additionally: consideration of AI technology evolution; full closure of the PDCA cycle within an integrated management system (ISO 31000, Clause 6.6; ISO/IEC 27001, Clause 10)

To mitigate these cyber-physical threats, the proposed model requires that identified risks be transferred into a strictly defined framework of contractual obligations. Organizations should include uncompromising requirements in service level agreements (SLAs) regarding incident notification within specified timeframes, diversification of software code supply sources, and mandatory provision of software specifications. Such specifications act as a “software bill of ingredients,” enabling security specialists to

rapidly identify vulnerabilities (e.g., outdated code libraries) in third-party components that are invisibly embedded in critical logistics systems [2].

The specificity of logistics risk management for critical infrastructure enterprises is shaped under the pressure of full-scale military aggression. The scale of daily destruction requires businesses not merely situational adaptation of existing systems, but a fundamental rethinking of the very philosophy of national resilience, which makes the principles of ISO 28000 vitally necessary. As an unavoidable response to these challenges, the expert community and public institutions have conceptually identified physical decentralization as the primary instrument for national survival.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The evolution of theoretical approaches and practical instruments for logistics risk management at critical infrastructure enterprises demonstrates a fundamental shift in the paradigm of global corporate governance. The current stage, formalized by the provisions of ISO 28000:2022, definitively moves security issues beyond the narrow context of physical perimeter protection and cargo escort to the level of strategic, integrated organizational resilience [19]. Ensuring the viability of supply chains is no longer the exclusive prerogative of security services; rather, it requires seamless and deep integration of risk identification and prevention processes within quality management systems, environmental monitoring, cybersecurity of information networks, and business continuity protocols under a unified Integrated Management System (IMS) model [20].

In the logistics industry, particularly at the stage of choosing a certification strategy, enterprise management often faces the question of whether to adopt the systemic standard ISO 28000 or to rely on narrowly specialized sectoral standards such as TAPA (Transported Asset Protection Association) or the U.S. program C-TPAT (Customs-Trade Partnership Against Terrorism). A comprehensive comparative analysis of these systems indicates their operational complementarity while simultaneously revealing fundamental differences in their strategic scope and application philosophy (Table 3).

Table 3. Comparative analysis of ISO 28000 and narrowly specialized sectoral standards

Characteristic	ISO 28000:2022	TAPA (FSR/TSR)	C-TPAT
Primary focus	Comprehensive security and resilience management system for the organization [19]	Prevention of asset losses and theft [21]	Customs security and counter-terrorism protection in supply chains [20]
Scope of application	Global; applicable to all types of risks (physical, cyber, operational, financial) and all types of organizations [19]	Specific; focused on physical security of warehouse facilities (FSR) and in-transit cargo transportation (TSR) [19]	Geographically oriented primarily toward imports to the United States and international trade with U.S. partners [20]
Methodology	Process-oriented (PDCA); requires risk assessment and involvement of top management [19]	Oriented toward strict physical security standards (specifications for walls, locks, cameras, alarm systems) [21]	Oriented toward partnership with customs authorities and compliance with partner validation requirements [20]

TAPA standards are highly effective in establishing minimum acceptable physical security barriers, such as protection of walls and roofs, alarm system configuration, access control to warehouse facilities, and in-transit operations [19]. However, their focus is strictly limited to counteracting criminal encroachments on cargo. C-TPAT, in turn, concentrates on the specifics of customs control [20].

In contrast to these specialized instruments, ISO 28000 offers a global and comprehensive approach. It addresses not only theft prevention but also a far broader spectrum of threats, including cyberattacks on routing systems, insider sabotage, financial fraud, information security risks, consequences of natural disasters, and the management of relationships with all stakeholders without exception [21]. Successful certification under ISO 28000 requires a systemic approach and strong leadership commitment from top management, which makes this standard an indispensable foundation for the strategic management of critical infrastructure enterprises. At the same time, TAPA standards can effectively serve as operational-level tools – specific procedural controls implemented within the broader ISO 28000 architecture to meet targeted protection requirements of individual logistics hubs [22].

The proposed logistics risk management structure corresponds to the modern paradigm of cyber-physical security. Under conditions of total digitalization, critical infrastructure enterprises must implement new models of corporate AI risk governance that take into account the stringent requirements of the European NIS2 and CER directives. Logistics companies are required to fundamentally revise contractual relationships by introducing uncompromising cybersecurity hygiene requirements into service level agreements (SLAs) with transport service providers, software developers, and IoT equipment vendors. The use of software specifications, such as Software Bills of Materials (SBOMs), and regular independent audits of routing algorithms should become routine verification procedures to prevent data-poisoning attacks. Ensuring the resilience of critical infrastructure supply chains is not a static condition achieved by certification, but a permanent, complex, iterative process requiring the engagement of the full intellectual and resource potential of enterprises. Only through the synergistic combination of the rigorous, internationally proven ISO 28000 risk management methodology, breakthrough technological innovations, and unprecedented strategic flexibility can a national logistics system be built that is capable not only of absorbing the devastating shocks of the ongoing war, but also of transforming into a powerful and reliable driver of sustainable long-term macroeconomic recovery.

For Ukraine, which has found itself on the front line of confrontation between global systems, the implementation of the requirements and guidelines of the ISO 28000 series is no longer a matter of reputation or competitive advantage – it has acquired an existential significance for the survival of the logistics system, particularly with regard to critical infrastructure facilities. Given the catastrophic scale of physical destruction of transport and energy infrastructure, estimated at tens of billions of dollars, and considering the systemic nature of hostile attacks on vital logistics nodes, outdated centralized management models have demonstrated their fatal vulnerability. Based on a detailed analysis of the evolution of standards, the latest European directives, and the specific conditions of the current wartime context, it is possible to formulate a set of strategic recommendations for managers of critical infrastructure enterprises and governmental institutions.

The wartime experience has demonstrated the necessity of scaling unique mechanisms of public–private partnership in the defense sector. Ensuring the security of strategic supply chains under current conditions has ceased to be an exclusive function of the state. The formation of joint investment funds for the development of “smart” logistics, co-financing the deployment of local electronic warfare and air defense systems for commercial facilities, and the creation of redundant, protected communication lines together form an innovative hybrid security shield.

There is also a critical need for the urgent modernization of the national regulatory and legal framework. Governmental standardization bodies must immediately harmonize the outdated DSTU ISO 28000:2008 with the provisions of the current global standard ISO 28000:2022. This is not merely a formal procedure, but the establishment of a foundation that will enable Ukrainian businesses to integrate the concept of *resilience* and communicate in a common language with international partners, insurance companies, and European investment funds. In turn, this will serve as a catalyst for accelerated adaptation of more than eighty unimplemented EU transport directives, opening critically needed access to billions of euros in financial resources within the framework of the European TEN-T programme.

CONCLUSIONS

The logistics risk management process within supply chain security management systems of critical infrastructure facilities has been improved through the implementation of the requirements of ISO 28000:2022. The proposed approach differs from existing ones by integrating the requirements of ISO 31000:2018 and ISO/IEC 27001:2022, with mandatory consideration of artificial intelligence risks in accordance with ISO/IEC 42001.

The enhanced logistics risk management process includes context definition and supply chain mapping with automated application of AI tools and preliminary assessment of AI-related risks; identification of assets and sources of threats with the inclusion of AI models and datasets; vulnerability analysis and probability assessment using AI for anomaly detection; consequence analysis incorporating the assessment of ethical and social AI risks; application of AI for scenario simulation; development of security plans and risk treatment with integration of specific AI countermeasures; and continuous improvement taking into account the evolution of AI technologies.

Under conditions of hybrid threats and rapid digitalization, reactive approaches–focused on mitigating consequences after an incident–prove to be insufficiently effective. Resilience can be achieved only through proactive management, including continuous monitoring, AI-based risk forecasting, regular simulations, and systematic control. In this context, the use of artificial intelligence may act both as a source of risk and as a

powerful tool for enhancing resilience, particularly through real-time anomaly detection and scenario modeling.

REFERENCES

1. Akinyeye, O., Odutola, A. A., & Badejo, D. (2024). Assessing the impact of ISO 28000:2022 security management systems on supply chain resilience and risk mitigation. *International Journal of Management, Social Sciences, Peace and Conflict Studies*, 7(1). <https://www.ijmsspcs.com/index.php/IJMSSPCS/article/view/644>
2. Wong, H. I., Sorooshian, S., & Hasan, M. (2019). Benefits that attract industry to implement ISO 28000 to secure supply chain. *TEM Journal*, 8(1), 119–124. <https://doi.org/10.18421/TEM81-17>
3. Parlov, N., Akrap, G., & Esterhajer, J. (2025). Supply chain security and AI risk governance model for critical infrastructure under NIS2, CER, and CRA. *ACIG Journal*, 4(1). <https://www.acigjournal.com/Supply-Chain-Security-and-AI-Risk-Governance-Model-for-Critical-Infrastructure-under-211823,0,2.htm>
4. Bugayko, D., & Reznik, V. (2025). Comparative analysis of Ukrainian legislation and international norms regulating the formation and management of the logistics system. *International Journal of Transportation Research and Technology*, 2(1), 49–58. <https://doi.org/10.71108/transporttech.vm02is01.04>
5. Hellberg, R., & Lundmark, M. (2025). Transformation in European defence supply chains as Ukraine conflict fuels demand. *Scandinavian Journal of Military Studies*. <https://sjms.nu/articles/10.31374/sjms.303>
6. Ekwall, D. (2012). Supply chain security – Threats and solutions. In N. Banaitiene (Ed.). *Risk management – Current issues and challenges*, 4–7. <https://doi.org/10.5772/48365>
7. Pan, S., Trentesaux, D., McFarlane, D., Montreuil, B., Ballot, E. & Huang, G. Q. (2021). Digital interoperability in logistics and supply chain management: State-of-the-art and research avenues towards Physical Internet. *Computers in Industry*, 128, Article 103435. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103435>
8. Powell, T. C. (2017). Strategy as diligence: Putting behavioral strategy into practice. *California Management Review*, 59(3), 162–190. <https://doi.org/10.1177/0008125617707975>
9. Steinbach, A. L., Holcomb, T. R., Holmes, R. M., Devers, C. E. & Cannella, A. A. (2017). Top management team incentive heterogeneity, strategic investment behavior, and performance: A contingency theory of incentive alignment. *Strategic Management Journal*, 38(8), 1701–1720. <https://doi.org/10.1002/smj.2628>
10. Atadoga, A., Osasona, F., Amoo, O.O., Farayola, O.A., Ayinla, B.S. & Abrahams, T.O. (2024). The role of it in enhancing supply chain resilience: a global review. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(2), 336–351. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i2.774>
11. Becker, A., Ng, A. K., McEvoy, D. & Mullett, J. (2018). Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains. *WIREs Climate Change*, 9(2), Article e508. <https://doi.org/10.1002/wcc.508>
12. European Business Association. (2023). Annual Survey of Ukrainian Logistics Sector: Digital Infrastructure and Innovation Needs. <https://eba.com.ua>
13. Frederico, G. F. (2023). ChatGPT in supply chains: Initial evidence of applications and potential research agenda. *Logistics*, 7(2), Article 26. <https://doi.org/10.3390/logistics7020026>
14. Masip-Bruin, X., Marín-Tordera, E., Ruiz, J., Jukan, A., Trakadas, P., Cernivec, A., Lioy, A., López, D., Santos, H., Gonos, A., Silva, A., Soriano, J., & Kalogiannis, G. (2021). Cybersecurity in ICT Supply Chains: Key Challenges and a Relevant Architecture. *Sensors*, 21(18), 6057. <https://doi.org/10.3390/s21186057>
15. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements (ISO/ IEC 27001:2022). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/27001>.
16. Mora Lozano, P. E., & Montoya-Torres, J. R. (2024). Global Supply Chains Made Visible through Logistics Security Management. *Logistics*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.3390/logistics8010006>
17. Blös, M.F.; Hoeflich, S.L.; Dias, E.M.; Wee, H.-M. (2016). A note on supply chain risk classification: Discussion and proposal. *Int. J. Prod. Res.*, 53, 1568–1569.

18. Kalaiarasan, R.; Olhager, J.; Agrawal, T.K.; Wiktorsson, M. (2022). The ABCDE of supply chain visibility: A systematic literature review and framework. *Int. J. Prod. Econ.*, 248, 108464.
19. E. Glerean. (2025). Fundamentals of secure AI systems with personal data, European Data Protection Board, Support Pool of Experts Programme. [Online]. Available: https://www.edpb.europa.eu/system/files/2025-06/spe-training-onai-and-data-protection-technical_en.pdf.
20. Tyrkalo Y. (2022). Entrepreneurial Risks: Causes, Consequences and Management (Theoretical Aspects). *Path of Science*, 8(1), 3010–3017. <http://dx.doi.org/10.22178/pos.78-4>
21. Hirna O. B. (2020) Logistics and supply chains: challenges of the COVID-19 pandemic. *Black Sea Economic Studies*, 55–1, 87–93. <https://doi.org/10.32843/bses.55-14>
22. Skrynkovskyy R., Tyrkalo Y. (2021). Entrepreneurial Risks: Nature, Types, Assessment Methods and Ways to Reduce Them. *Path of Science*, 7(12), 2015–2023. <http://dx.doi.org/10.22178/pos.77-11>

Цопа В.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Літвінова Я.В., Клименко І.Ю. Вдосконалення процесу керування логістичними ризиками підприємств критичної інфраструктури

Ланцюги постачання підприємств критичної інфраструктури в сучасних умовах характеризуються високою складністю, цифровізацією та зростанням рівня гібридних загроз, що обумовлює необхідність переходу від реактивних до проактивних підходів управління логістичними ризиками. Метою статті є вдосконалення процесу керування логістичними ризиками в системах управління безпекою ланцюга постачань об'єктів критичної інфраструктури шляхом імплементації вимог міжнародного стандарту ISO 28000:2022.

У дослідженні застосовано системний аналіз для розгляду ланцюгів постачання як складних взаємопов'язаних екосистем, а також методи математичного та логічного моделювання для формалізації оцінки ризиків як функції ймовірності реалізації загроз та тяжкості їх наслідків. Запропоновано вдосконалений процес керування логістичними ризиками, що базується на інтеграції вимог стандартів ISO 28000:2022, ISO 31000:2018 та ISO/IEC 27001:2022 із обов'язковим урахуванням ризиків, пов'язаних із застосуванням штучного інтелекту відповідно до ISO/IEC 42001.

Вдосконалений процес охоплює визначення контексту та картування ланцюга постачання із використанням інструментів штучного інтелекту, ідентифікацію активів і джерел загроз з урахуванням ШІ-моделей і датасетів, аналіз вразливостей та оцінку ймовірності інцидентів, аналіз наслідків із врахуванням етичних і соціальних ризиків ШІ, сценарне моделювання, розробку планів безпеки та оброблення ризиків, а також безперервне вдосконалення системи з урахуванням еволюції цифрових технологій. Практичне впровадження запропонованого підходу спрямоване на підвищення стійкості ланцюгів постачання об'єктів критичної інфраструктури в умовах динамічних ризиків і прискореної цифровізації.

Ключові слова: ISO 28000, критична інфраструктура, управління логістичними ризиками, стійкість ланцюгів постачання, інтегровані системи управління, кіберфізична конвергенція, децентралізація інфраструктури, безперервність бізнесу.

ЦОПА Віталій Андрійович, доктор технічних наук, професор кафедри менеджменту та економіки, Приватний вищий навчальний заклад «Міжнародний інститут менеджменту (МІМ-Київ)» e-mail: tsopa.v.a@nmu.one, ORCID: 0000-0002-4811-3712.

ЧЕБЕРЯЧКО Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: cheberiyachko.s.i@nmu.one, ORCID: 0000-0003-3281-7157.

ДЕРЮГІН Олег Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: deriuhin.o.v@nmu.one, ORCID: 0000-0002-2456-7664.

ЛІТВІНОВА Яна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: litvinova.ya.v@nmu.one, ORCID: 0000-0003-2806-4076.

КЛИМЕНКО Ірина Юріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: klymenko.i.yu@nmu.one, ORCID: 0000-0002-6263-0951.

Vitalii TSOPA, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Management and Economics, Private Higher Educational Institution “International Management Institute (MIM-Kyiv)”, e-mail: tsopa.v.a@nmu.one, ORCID: 0000-0002-4811-3712.

Serhii CHEBERYACHKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Labour Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology, e-mail: cheberiachko.s.i@nmu.one, ORCID: 0000-0003-3281-7157.

Oleh DERYUGIN, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, e-mail: deriuhin.o.v@nmu.one, ORCID: 0000-0002-2456-7664.

Yana LITVINOVA, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Head of the Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, e-mail: litvinova.ya.v@nmu.one, ORCID: 0000-0003-2806-4076.

Iryna KLYMENKO, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, e-mail: klymenko.i.yu@nmu.one, ORCID: 0000-0002-6263-0951.

Дата надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

<https://doi.org/10.36910/p22jya05>

Turpak S., Mukovska D.
National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

STUDY OF THE DYNAMICS OF EXPORT METAL PRODUCTS FREIGHT FLOWS AND THEIR MATHEMATICAL MODELING UNDER CONDITIONS OF AN UNSTABLE ENVIRONMENT

The article examines how export transportation of metal products by rail changed under conditions of abrupt transformations in the external environment. Particular attention is paid to the state of the transportation process before the onset of large-scale disruptive events and to the way it evolved under their influence, reflecting its gradual adaptation to new operating conditions.

For quantitative assessment, the following statistical indicators were selected: mean value, standard deviation, and coefficient of variation. This approach made it possible not only to determine the transportation volume levels but also to identify the internal irregularity of transportation over time, particularly the periods when fluctuations became sharper and less predictable.

The results indicate that the transportation process underwent significant changes during the study period. Initially, it functioned relatively steadily; however, it later shifted into a phase of pronounced instability. Subsequently, signs of a new operating regime gradually emerged, better adapted to existing conditions. At the same time, the variability of indicators increased, and the nature of their fluctuations changed. Changes in the intra-annual distribution of transportation volumes were also observed, further confirming the non-stationary nature of the process.

To describe these changes, a mathematical model combining a trend component and fluctuations with variable parameters is proposed. This approach makes it possible to simultaneously account for the general development trend and short-term deviations. Model validation demonstrated that it reproduces real dynamics with sufficient accuracy (mean relative error 11,81%, $R^2 = 0,55$), indicating its applicability as a practical analytical tool.

Overall, the obtained results contribute to a better understanding of transportation behavior under unstable conditions and may be useful for forecasting and decision-making in logistics management, particularly in situations characterized by uncertainty and variability.

Keywords: freight flows, export transportation, railway transport, mathematical modeling, seasonality, non-stationary process, transport system, variation, forecasting.

INTRODUCTION

In modern conditions, transport systems increasingly deviate from the traditional perception of stable and predictable structures. They are becoming more dependent on external factors, including economic and political conditions, as well as infrastructure status, and respond to them quite sensitively. What only a few years ago appeared to be a relatively organized process has now become subject to frequent changes. Under such circumstances, the issue of transportation stability becomes particularly important, as transport serves as the link between production, supply, and consumption.

Export transportation of metal products is one of the sectors where these changes are felt most acutely. On the one hand, it is an important component of the economy, generating financial inflows and supporting the functioning of entire industries. On the other hand, this segment is among the first to react to any disruptions. Changes in transportation routes, restrictions on specific sections, or infrastructure failures are immediately reflected in transportation volumes and operational rhythms. As a result, the system becomes vulnerable even to relatively local disturbances.

Under martial law conditions, this vulnerability is further intensified. Transport operations are accompanied by constant uncertainty, which is clearly reflected in transportation dynamics. Volumes may change sharply, sometimes without any obvious reason at first glance. Irregularity increases, with periods of relative calm alternating with sudden rises or declines. Seasonal patterns previously considered typical no longer function in the same way or manifest differently. At the same time, new logistics solutions emerge - often forced and sometimes temporary - but it is precisely these measures that enable the system to adapt, at least partially, to the new conditions.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

In contemporary transport system research, the focus is increasingly shifting from transportation volumes themselves to the way these volumes behave over time. This trend is quite natural, as freight flows prove to be far less stable than assumed by classical approaches. Even over short time intervals, their dynamics may change rather sharply, and such changes cannot always be adequately explained by standard models [1, 2].

Traditional time series analysis methods, such as ARIMA and exponential smoothing, remain fundamental analytical tools. However, their capabilities are limited by the assumption of relative process stability. When the data structure changes, the accuracy of such models decreases significantly. For this reason, they are increasingly being combined with machine learning methods [3, 4, 5]. This makes it possible to better capture complex dependencies that are not always suitable for linear description and improves model flexibility in practical applications [6, 7, 8].

This tendency is particularly evident in railway transportation. In this field, hybrid approaches have effectively become standard analytical tools. Most commonly, these are combinations of ARIMA and neural networks, where one part of the model is responsible for capturing the general trend, while the other accounts for more chaotic short-term fluctuations [3, 8]. It is precisely these fluctuations that usually create the greatest forecasting difficulties. Nevertheless, such models demonstrate better adaptability to data changes compared with classical approaches [6].

Seasonality should also be considered separately. In theoretical models, it is usually represented as stable and repetitive; however, real transport processes are more complex. Seasonal effects may vary both in intensity and in form. In some cases, they become almost imperceptible, while in others they intensify sharply. These features are better captured by modern exponential smoothing approaches with extended seasonal structures [4], as well as by grouped time series forecasting models [5].

The problem becomes even more complicated when the system is influenced by external factors. Crisis events, disruptions in logistics chains, and changes in transportation conditions all directly affect data behavior. In such cases, structural breaks and shifts in operating regimes are often observed and can be analyzed using change-point detection methods [9]. Similar effects are also actively studied in the context of supply chain resilience and adaptation [10, 11, 12].

In practice, this is reflected in the fact that models previously demonstrating acceptable accuracy begin to generate significant errors. The issue is not limited to changes in the trend alone - the structure of variation itself changes, and the assumption of stationarity is no longer valid [2, 5].

Machine learning methods partially address this issue, as they are better suited to capturing complex nonlinear relationships. However, they present another limitation: the results of such models are considerably more difficult to interpret [7]. Therefore, increasing attention is being paid to forecast explainability approaches, particularly the SHAP method, which makes it possible to evaluate the contribution of each variable to the model output [13].

When transport systems are considered more broadly, it becomes evident that they operate in a continuously changing environment and respond quite sensitively to external influences. This is especially apparent in the analysis of large-scale transport datasets, where even minor changes in operating conditions may cause noticeable fluctuations [14]. This phenomenon is most pronounced in export transportation of metal products, where freight flow dynamics are particularly sensitive to external factors.

As a result, a typical problem for this field emerges: some models describe long-term behavior effectively, while others better capture short-term fluctuations. Combining these aspects within a single approach remains challenging, yet this is precisely the direction in which current research is developing [3, 5].

The reviewed literature also confirms that classical time series models are based on the assumption of process stability. However, under real-world conditions, transport systems undergo continuous structural changes, which require more adaptive modeling approaches [4, 9].

Within the framework of this study, attention is focused not only on forecasting but also on analyzing how the structure of fluctuations changes over time. This makes it possible to gain a deeper understanding of freight flow behavior and to describe it more accurately under unstable conditions.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of the study is to identify patterns in changes in export transportation of metal products and to develop a model capable of adequately describing their dynamics under unstable conditions.

To achieve this aim, the following objectives were defined: to analyze transportation volumes for the period 2021 - 2025; to assess the stability level of the studied process; to identify the nature of key changes in transportation dynamics; to investigate the transformation of the seasonal structure; to develop a mathematical model of freight flows; to verify the model based on actual data; and to evaluate forecasting accuracy as well as the potential for further model improvement.

RESEARCH RESULTS

The object of this study is the process of export transportation of domestically produced metal products by railway transport. To assess the stability of this process, statistical indicators were used,

including the mean value, standard deviation, and coefficient of variation of transportation volumes (Table 1).

The application of these indicators makes it possible not only to characterize the overall level of transportation volumes but also to assess the intensity of their fluctuations over time. The analysis was conducted for two characteristic periods: the pre-war period (2021) and the period of operation under martial law conditions (2022 - 2025). This approach is consistent with methods used in the analysis of transport systems under crisis conditions and makes it possible to trace the transformation of the transportation process under the influence of external destabilizing factors.

These factors primarily include damage to transport and energy infrastructure caused by hostile attacks, changes in logistics routes, and restrictions on the use of rolling stock.

Table 1 – Statistical indicators of transportation process stability for 2021 - 2025

Year	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Notes
2021	1 310	95,22	7,27	stable process
2022	456,6	376,26	82,41	severe instability
2023	378,8	44,59	11,77	moderate fluctuations
2024	430,7	62,16	14,43	moderate fluctuations
2025	486,8	76,71	15,76	moderate fluctuations

The analysis of the indicators presented in Table 1 demonstrates a significant change in the nature of the transportation process during the study period. In 2021, transportation was characterized by a high level of stability, as confirmed by the low coefficient of variation (7,27%), which is typical of relatively predictable transport system operation.

In 2022, a sharp increase in the variability of transportation volumes was observed, with the coefficient of variation reaching 82.41%. Such dynamics indicate substantial disruptions in transport system functioning caused by wartime factors, including attacks on energy infrastructure, changes in transportation routes, and restrictions on export opportunities.

Beginning in 2023, a tendency toward partial stabilization of the transportation process can be observed. The coefficient of variation decreased to 11,77% and remained within the range of 14 - 16% during 2024 - 2025, corresponding to a moderate level of fluctuations. This trend indicates not a return to pre-war conditions, but rather the formation of an adaptive operating mode of the transport system.

Figure 1 presents the dynamics of transportation volumes, illustrating the transition from a relatively uniform distribution in the pre-war period to a sharp decline and increased irregularity in 2022, followed by gradual recovery in subsequent years.

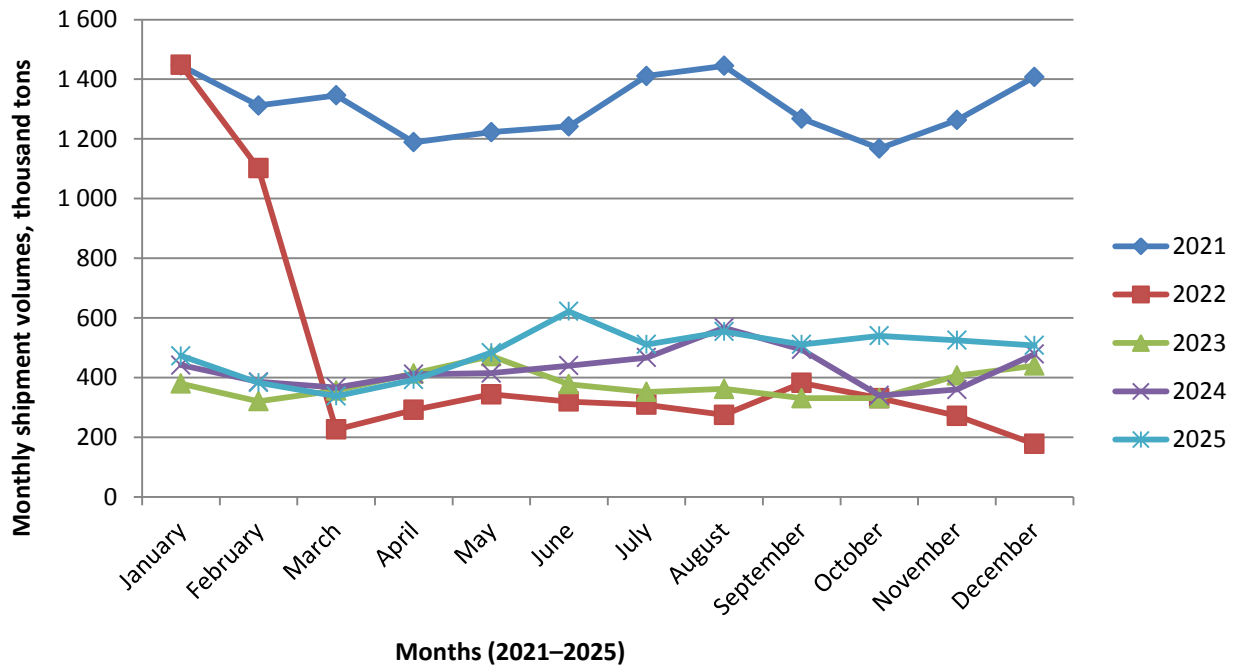


Figure 1 - Dynamics of transportation volumes by month (2021 - 2025)

The analysis of the graphical relationship confirms the identified trends: following a sharp decline in transportation volumes during the crisis period, their gradual recovery can be observed throughout 2023–2025.

The obtained results are consistent with the analysis of freight flow seasonality indices (Figure 2), which reflect the transformation of the intra-annual transportation structure. In 2022, the seasonal pattern experienced significant disruption, while in subsequent years a new seasonality model emerged, adapted to the changed operating conditions of the transport system.

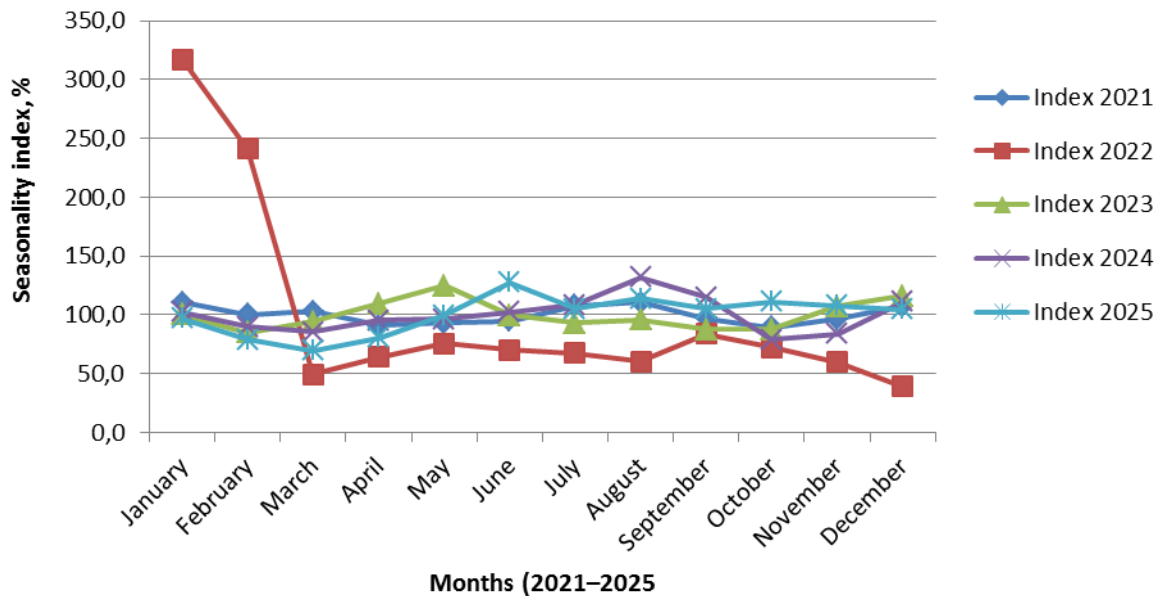


Figure 2 - Comparison of freight flow seasonality indices

Thus, the study results make it possible to distinguish three characteristic stages in the development of the transportation process: a stable pre-war period, a phase of sharp destabilization, and a stage of adaptation to new operating conditions.

Changes in the intra-annual transportation structure indicate the non-stationary nature of the process, which combines a long-term development trend with seasonal fluctuations of varying intensity.

These features determine the need for further development of a mathematical model capable of adequately reflecting the identified freight flow dynamics and accounting for the influence of external factors.

Mathematical model of freight flows.

To describe changes in freight flows over time, a mathematical model is considered that simultaneously accounts for the general development trend of transportation volumes and their characteristic seasonal fluctuations [11].

Let x denote the period number (month), and $f(x)$ - the freight flow volume at the corresponding time. In this case, the relationship can be expressed as:

$$f(x) = 90 \cdot e^{-0,028x} \cdot \sin(0,75x + 0,006x^2) + 4,8x + 312 \quad (1)$$

Parameter identification of the mathematical model was carried out using the least squares method, which was chosen due to the need to approximate the empirical time series with an analytical function and to minimize deviations between simulated and actual transportation values. This method is appropriate under conditions of a limited sample size (42 monthly observations), ensures the stability of parameter estimates, and preserves their interpretability.

It should be noted that the sample size limits the possibility of applying more complex stochastic or neural network-based models; however, it is sufficient for constructing an interpretable analytical dependence focused on analyzing the nature of dynamics rather than high-precision forecasting.

The application of the least squares method is consistent with the generally accepted practice of analyzing non-stationary transport processes and is a justified tool for estimating parameters of combined regression models [3, 13].

Unlike simplified approaches, the proposed model combines several components, each of which has its own substantive interpretation.

The linear component reflects the gradual change in transportation volumes over the long term. Its presence may be associated with the development of transport infrastructure, changes in demand structure, or the overall dynamics of economic activity.

At the same time, the oscillatory component captures seasonal effects, which in practice are rarely strictly periodic. In the model, these effects vary over time: the amplitude gradually decreases, which may indicate a certain stabilization of the process or adaptation of the system to new operating conditions.

Attention should also be paid to the argument of the sinusoidal function—it is nonlinear. This allows for changes in oscillation frequency to be taken into account, which is typical for real transport processes, especially under unstable external conditions.

Thus, the proposed dependence does not merely approximate the data but reflects the key features of freight flow dynamics.

To verify the appropriateness of the model, it was further tested against actual data.

Modeling Results and Validation.

After constructing the mathematical model, its validation was carried out by comparing the calculated values with the actual data. This approach is standard in time series model evaluation problems [12, 14].

Figure 3 presents the dynamics of actual and simulated transportation volumes. Overall, it can be noted that the model reproduces the main regularities of the process quite well: it captures both the general trend in the indicator and its seasonal fluctuations. At the same time, in certain periods, deviations between observed and modeled values can be seen, which is natural, as the model does not account for all possible external influences.

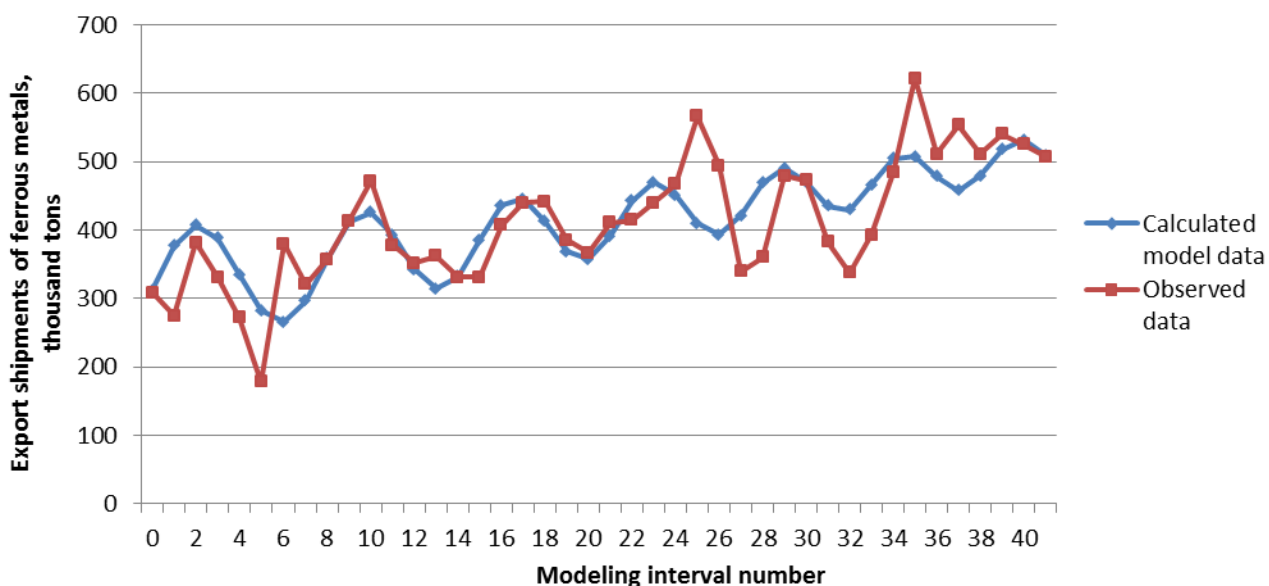


Figure 3 - Dynamics of actual and modeled freight flow values

For a quantitative assessment of approximation accuracy, a set of aggregate indicators was used. The coefficient of determination is $R^2 = 0,55$, which corresponds to a moderate level of agreement between the model and the observed data. This value is explained by the high variability of the studied process and the presence of external factors that are not formalized within the model, which is typical for non-stationary transport systems [7]. The mean absolute error equals 45,41, while the root mean square error is 59,84. The mean relative error is 11,81%, which can be considered an acceptable result for problems of this type.

Additionally, the behavior of model residuals was analyzed (Figure 4). In most cases, they fluctuate around the zero line, indicating the absence of systematic bias. At the same time, several significant deviations are observed, which are random in nature and are likely associated with the influence of external factors not accounted for in the model.

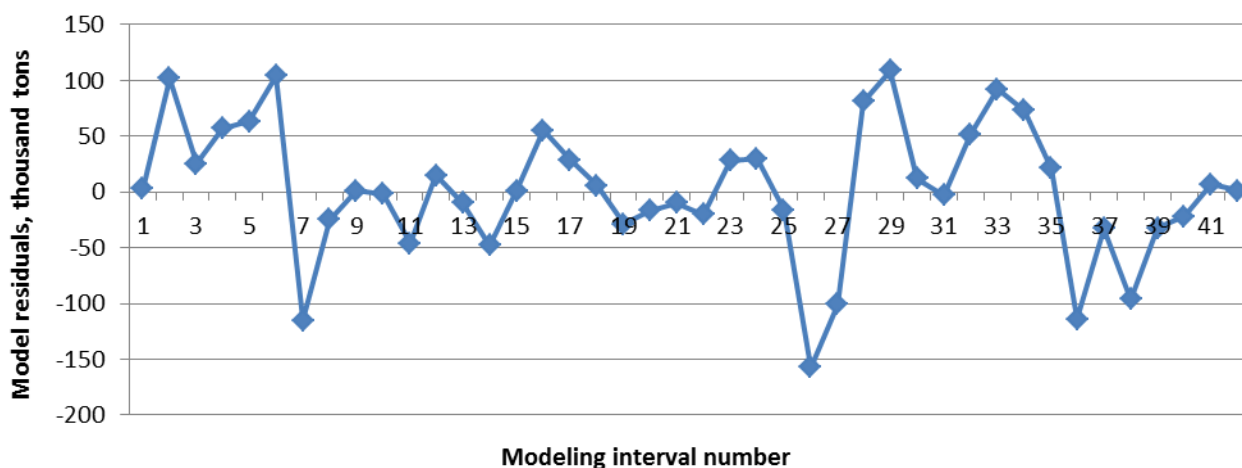


Figure 4 - Residual analysis of the model

The distribution of residuals (Figure 5) does not reveal any critical anomalies: the shape of the histogram is generally symmetric, although a full correspondence to a normal distribution is not observed.

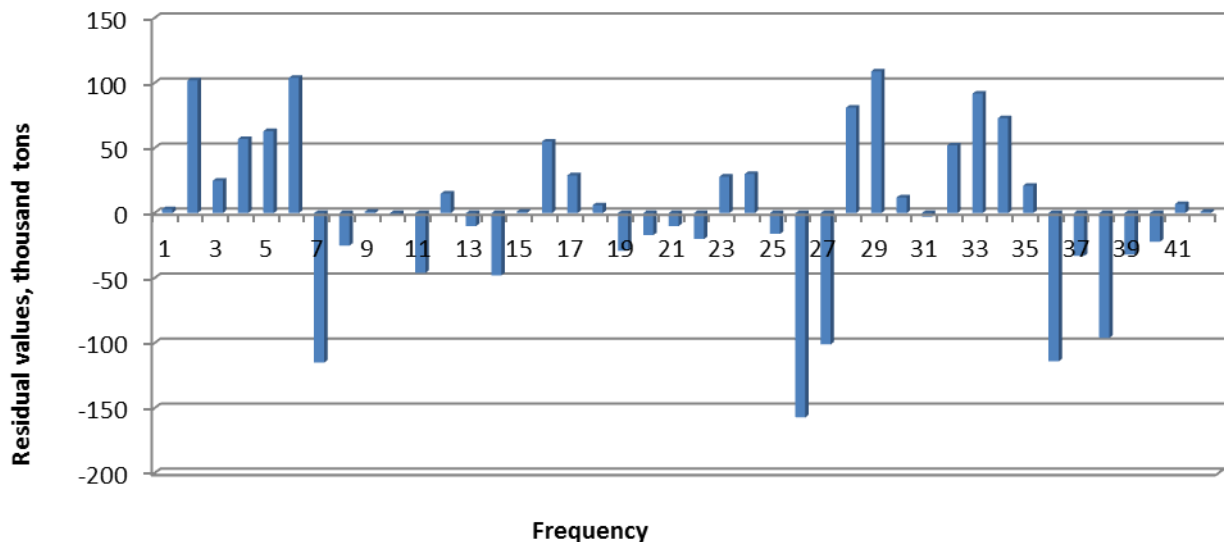


Figure 5 – Distribution of model residuals

Summarizing the results, it can be concluded that the developed model is suitable for the analysis and approximate forecasting of freight flows. At the same time, to improve accuracy, it is advisable to extend the model by incorporating additional factors, primarily those responsible for sharp fluctuations in transportation volumes.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The obtained results make it possible to generalize the observed changes in the transportation process. The sharp increase in variability in 2022 effectively indicates a loss of system stability and a disruption of its usual operating regimes. The subsequent reduction in fluctuations should not be interpreted as a return to the previous state; rather, it reflects a transition to a new, adapted operating regime.

A noticeable change is also observed in the seasonal structure. This indicates that the process has become non-stationary and that its internal organization has changed.

The proposed model only partially captures these changes, as it does not account for external factors influencing transportation dynamics. In practical terms, it reproduces the general behavior of the time series reasonably well and can therefore be used for approximate forecasting; however, it requires further refinement when higher accuracy is needed.

As the analysis shows, transportation dynamics are not homogeneous: they combine slow long-term changes with pronounced short-term fluctuations. Statistical evaluation made it possible to clearly identify the turning point in 2022, when stability was effectively lost, followed by a transition to a different system operating mode.

Overall, the model reflects the main characteristics of the process - trend, seasonality, and time-varying amplitude of fluctuations-thereby enabling a shift from a descriptive representation of the phenomenon to a more formalized analytical framework.

CONCLUSIONS

The conducted study has shown that transportation dynamics are complex and heterogeneous. They combine long-term changes with short-term fluctuations, which may differ significantly in intensity.

Three main stages of process development have been identified: stable, crisis, and adaptive. The most pronounced changes occurred in 2022, after which the system gradually transitioned to a new operating regime.

The proposed model allows for the description of the main features of the process, including trend, seasonality, and time-varying amplitude of fluctuations. At the same time, it requires further improvement, particularly through the inclusion of external factors. In future research, it would be appropriate to consider incorporating exogenous variables such as infrastructure, energy, and regulatory factors.

LITERATURE

1. Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2022). The M5 accuracy competition: Results, findings and conclusions. *International Journal of Forecasting*, 38(4), 1346-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.013>

2. Lim, B., Zohren, S., & Roberts, S. (2021). Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 37(4), 1748-1764. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.03.012>
3. Hewamalage, H., Bergmeir, C., & Bandara, K. (2021). Recurrent neural networks for time series forecasting: Current status and future directions. *International Journal of Forecasting*, 37(1), 388-427. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>
4. Zhang, G. P. (2022). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 500, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.05.091>
5. De Livera, A. M., Hyndman, R. J., & Snyder, R. D. (2021). Forecasting time series with complex seasonal patterns using exponential smoothing. *Journal of the American Statistical Association*, 116(535), 1181–1194. <https://doi.org/10.1080/01621459.2020.1765786>
6. Truong, C., Oudre, L., & Vayatis, N. (2022). Selective review of offline change point detection methods. *Signal Processing*, 167, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107299>
7. Ivanov, D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic: A conceptual and formal generalisation of adaptation strategies. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3535-3552. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852>
8. Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing disruption risks. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1371-1384. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1761612>
9. Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., & Fosso Wamba, S. (2022). Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: Mapping a research agenda. *International Journal of Production Research*, 60(1), 1-23. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1932444>
10. Chakraborty, P., & Sharma, A. (2023). Big data analytics in transportation systems: Methods and applications. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 170, 103035. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.103035>
11. Montero-Manso, P., & Hyndman, R. J. (2021). Principles and algorithms for forecasting groups of time series: Local vs global approaches. *International Journal of Forecasting*, 37(4), 1632-1653. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.03.001>
12. Lundberg, S. M., & Lee, S.I. (2021). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
13. Ben-Dor, G., & Ben-Elia, E. (2022). Urban freight transport under uncertainty: A systematic review. *Transport Reviews*, 42(6), 1-24. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2037341>
14. Barceló, J., & Montero, L. (2021). Traffic simulation and forecasting in intelligent transportation systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103361. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103361>

Турпак С.М., Муковська Д.Я. Дослідження динаміки експортних вантажопотоків металопродукції та їх математичне моделювання в умовах нестабільного середовища

У статті простежено, як змінювалися експортні перевезення металопродукції залізницею в умовах різних змін зовнішнього середовища. Акцент зроблено на тому, яким був стан транспортного процесу до початку повномасштабних подій і як саме він почав змінюватися під їх впливом, тобто як відбувалася його поступова перебудова.

Для кількісної оцінки обрано такі статистичні індикатори - середнє значення, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації. Такий підхід дав змогу не лише зафіксувати рівень перевезень, а й побачити їхню внутрішню «нерівність» у часі, зокрема виявити періоди, коли коливання ставали більш різкими та менш передбачуваними.

Результати свідчать, що транспортний процес за досліджуваний період зазнав відчутних змін: якщо спочатку він функціонував відносно рівномірно, то згодом перейшов у фазу різкої нестабільності. Після цього поступово почали проявлятися ознаки нового режиму роботи, більш пристосованого до наявних умов. При цьому зросла мінливість показників, а характер їх коливань став іншим. Також звертає на себе увагу зміна внутрішньорічного розподілу перевезень, що додатково підтверджує нестационарність процесу.

Для опису цих змін запропоновано математичну модель, у якій поєднано трендову складову та коливання зі змінними параметрами. Це дозволяє одночасно враховувати загальну тенденцію розвитку і короткострокові відхилення. Перевірка показала, що модель досить добре відтворює

реальну динаміку (середня відносна похибка становить 11,81 %, $R^2 = 0,55$), тобто може використовуватися як робочий інструмент аналізу.

У цілому отримані результати дають можливість краще зрозуміти поведінку перевезень у нестабільних умовах і можуть бути корисними при прогнозуванні та прийнятті управлінських рішень у сфері логістики, особливо тоді, коли середовище залишається невизначеним і змінним.

Ключові слова: вантажопотоки, експортні перевезення, залізничний транспорт, математичне моделювання, сезонність, нестационарний процес, транспортна система, варіація, прогнозування.

ТУРПАК Сергій Миколайович - доктор технічних наук, завідувач кафедри «Транспортні технології», Національний університет «Запорізька Політехніка», E-mail: sergeyturpak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

МУКОВСЬКА Дар'я Яківна - доктор філософії (PhD) з транспортних технологій, старший викладач кафедри «Транспортні технології», Національний університет «Запорізька Політехніка», e-mail: dariamykovska@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4184-0861>

Serhii TURPAK, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Transport Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic. E-mail: sergeyturpak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

Daria MUKOVSKA, Doctor of Philosophy (PhD) in Transport Technologies, Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic. E-mail: dariamykovska@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4184-0861>

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/ha7dw842>

Zytsev Y.V., Voroshylov P.A.
Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

RESISTANCE FORCES WHEN DRIVING A PASSENGER CAR

The discrepancy between the calculated and experimental values of vehicle drag force in the 30–160 km/h range is explained by the use of a constant exponent, $\alpha = 2$, in the aerodynamic drag formula. Based on road tests, an average $\alpha(v)$ relationship was obtained, with a minimum $\alpha = 1.98$ at around 120 km/h and a maximum $\alpha = 2.15$ at around 33 km/h. Including a variable α reduces the discrepancy by a factor of 5–10, increasing the accuracy of modeling and fuel consumption calculations.

Factor analysis revealed that the main differences between the calculated and experimental forces are due to imperfections in the aerodynamic drag model, especially during the transition from laminar to turbulent flow. Other factors—vehicle vibrations, H/B ratio, final drive ratio, and tire profile—have a significantly lesser influence. Aerodynamics is the most important factor: the C_x and $C_x \cdot F$ indices have virtually equal influence.

The average $\alpha(v)$ relationship is similar for all vehicle categories, although significant variability remains within each group. The introduction of variable α significantly reduces the discrepancies between theory and experiment, enabling more accurate calculations and predictions of vehicle dynamics. This allows engineers to adjust computational models, take real-world aerodynamic effects into account during design, and assess the impact of speed on air resistance. This approach also provides a basis for optimizing body and chassis design aimed at reducing fuel consumption and improving vehicle efficiency in real-world driving conditions. Furthermore, the use of variable α helps identify critical speed ranges where air resistance has the greatest impact on vehicle dynamics and can serve as a starting point for further research into improving vehicle aerodynamics and energy efficiency.

Key words: car, wheel, resistance, aerodynamics, air resistance.

INTRODUCTION

Modern automotive development is characterized by a strong focus on reducing greenhouse gas emissions, which is directly related to lower fuel consumption. Even a reduction in fuel consumption by a few tenths of a liter per 100 km is considered significant. One of the primary ways to achieve this goal is by reducing the drag that occurs when the vehicle is moving. At medium and high speeds, air resistance has the greatest impact. In production vehicles, its value becomes comparable to rolling resistance at speeds of approximately 70–75 km/h, and significantly exceeds it at higher speeds (approximately 3–4 times at speeds of 130–150 km/h). Therefore, improving the accuracy of aerodynamic drag measurement and calculation methods is an important engineering challenge.

ANALYSIS OF LITERARY DATA AND PROBLEM STATEMENT

A generally accepted formula is used to determine the aerodynamic drag force:

$$P_w = k * F * v^2 / 3,6^2 \quad (1)$$

where k is the streamlining coefficient, $N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$; $k = 0.5 C_x \cdot \rho_v$ (where C_x is the aerodynamic drag coefficient and ρ_v is the air density, kg/m^3); F is the vehicle's frontal area, m^2 .

However, as noted in [1, 2], the results of calculations using this formula do not completely coincide with road test data. In some cases, the discrepancies are quite significant, with the greatest difference observed at speeds above 80–100 km/h (Fig. 1).

According to the analysis given in source [1], the main reason for the observed discrepancies is related to the use of an overly simplified aerodynamic drag model.

Two possible hypotheses were put forward: a change in the value of the coefficient C_x and a change in the exponent at a speed equal to "2". The choice between them is determined by how the coefficient C_x is interpreted.

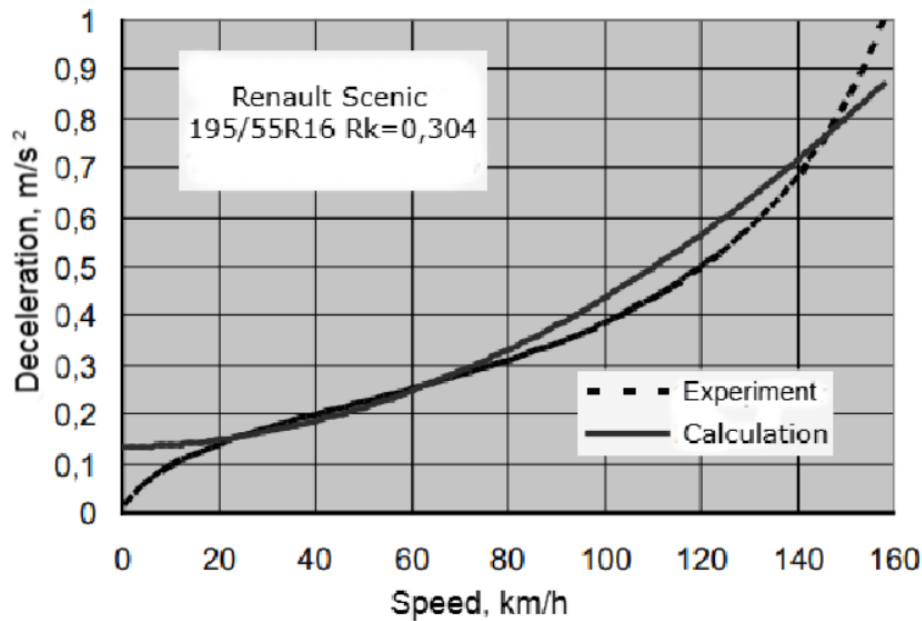


Fig. 1. Analysis of the influence of factors on the differences between calculated and experimental resistance forces.

AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

If the coefficient C_x is considered a constant characteristic of an object, determined solely by its shape and surface condition, then the hypothesis of variability of the exponent with velocity should be accepted. In the example given in [1], the value of this exponent ranges from 1.95 to 2.1.

If the coefficient C_x is treated not as an intrinsic property of the object, but as the result of mathematical transformations, that is, as a variable quantity, its value can vary between 0.3 and 0.5. However, this option is considered less likely.

The first hypothesis appears preferable, as it allows for a more unambiguous explanation of the phenomenon under consideration and requires less variability in the calculated exponent. Furthermore, this approach better reflects the complexity of the processes occurring in the transition region from laminar to turbulent flow, where existing theoretical models do not provide high estimation accuracy.

We were unable to find any data in the available publications that would confirm or refute this hypothesis as it applies to automobiles (with the exception of outdated information discussed in [1]). However, this view is generally accepted in a number of other fields.

RESEARCH RESULTS

For example, when calculating the deceleration of a bullet in flight, R [3], the following formula is used:

$$R = A * v^m \quad (2)$$

In this formula, the exponent m varies significantly depending on speed and can take values in the range of 1.5 to 3. For speeds from 0 to 840 ft/s (i.e., 0–256 m/s), the average value $m = 1.6$ is given.

In [4], devoted to studying air resistance during a body's fall at low speeds, an exponent of 2.5 was obtained, while other studies by the same author provide a value of 2.7.

In [7], based on a large number of examples, the discrepancies between calculated and experimentally obtained values of drag (ΔF) were examined, and empirical formulas for corrections to standard calculation methods were proposed. However, an analysis of the factors causing these discrepancies was not conducted in this study.

To improve the accuracy of traction and speed calculations by refining mathematical models of vehicle drag, several problems must be addressed:

- analyze the factors causing differences between calculated and experimental drag values;
- develop empirical relationships suitable for the practical determination of vehicle drag forces in the speed range of 30–160 km/h;
- determine the average dependence of the exponent in the aerodynamic drag formula on vehicle speed.

The study analyzed a set of field test results published in Autoreview magazine and processed using the methodology of [6, 7]. Methods applied in experimental design theory [5] were used in data processing.

The set of factors was formed based on parameters available in publicly available vehicle specifications and specialized literature. Since the driving conditions under consideration are dominated by air resistance, aerodynamic parameters were chosen as the primary factors: the aerodynamic drag coefficient C_x and the product $C_x \cdot F$ (sometimes referred to as the "effective drag area" or "drag area").

The second most significant source of additional drag was vehicle oscillations, determined by suspension characteristics and geometric design parameters, in particular the ratio of the center of mass height h_c to the wheelbase B . It is this ratio, all other things being equal, that influences the oscillations of the sprung mass, leading to additional energy losses in the shock absorbers and tires.

Since suspension parameters and the value of h_c are typically not available in publicly available vehicle specifications, the overall vehicle height H was used instead of the center of mass height, assuming a certain correlation between these quantities.

The next factor was the final drive ratio u_0 . As this parameter increases, the influence of the transmission's idle resistance on vehicle coasting increases. Finally, the influence of tires was taken into account using the aspect ratio (AFR). All factors considered were converted to relative values ranging from 0 to 5.

The most significant factor (Fig. 2) was the vehicle's aerodynamic characteristics. The C_x and $C_x \cdot F$ product have virtually equal influence, allowing either to be used in the calculations. The second most influential parameter is the H/B ratio.

The remaining factors have a significantly lesser impact. An unexpected result was the negative influence of the final drive ratio, while the tire aspect ratio, on the contrary, showed a positive effect. Clearly, these factors require a more detailed analysis.

In general, it is possible to approximate the correction to the calculated values using the following empirical relationship:

$$\sum A = 96 + 102(C_x F - 0,83) - 130\left(\frac{H}{B} - 0,56\right) \quad (3)$$

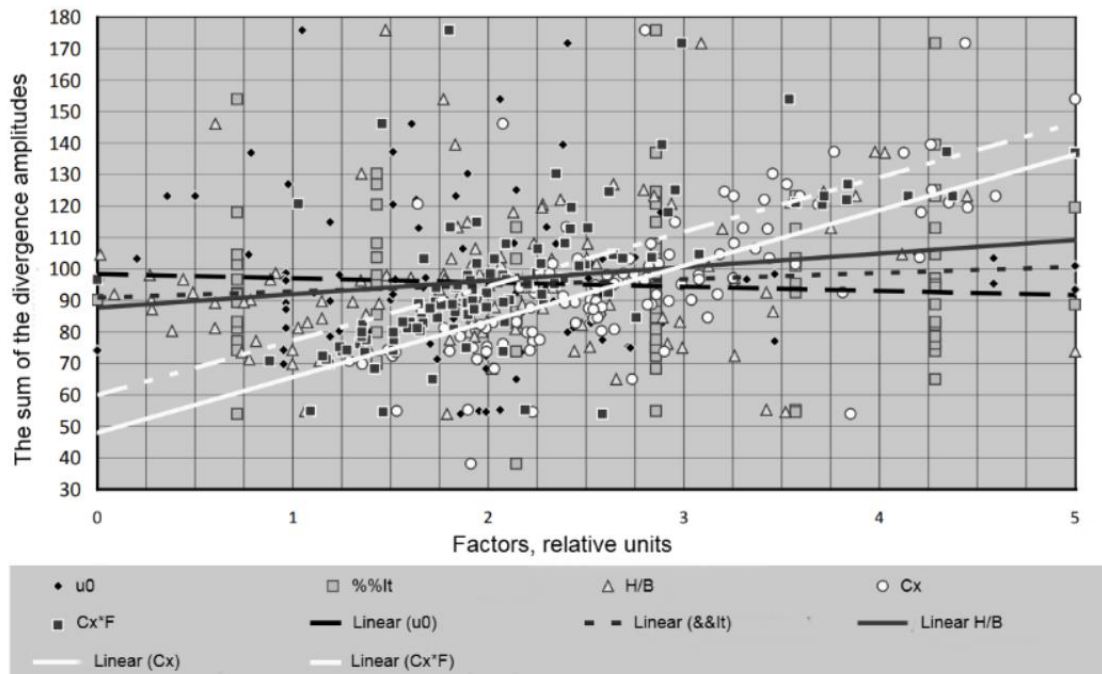


Fig. 2. Analysis of the influence of factors on the differences between calculated and experimental resistance to movement

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

As noted in [1], a hypothesis was put forward regarding the variability of the exponent α in the aerodynamic drag formula, and its possible dependence on speed was demonstrated using the example of a

Ford Mondeo sedan coasting. Using the above-described experimental data set, similar calculations were performed and the $\alpha(v)$ dependencies were analyzed for 96 passenger cars.

The nature of the resulting dependencies was similar for all vehicles; however, the variability of the exponent, especially at low speeds, remained significant (Fig. 3, A).

An attempt to classify the data set by the H/B ratio did not yield the expected result: the variability of α in each category remained high. Nevertheless, the average $\alpha(v)$ dependencies for all vehicles were quite close to each other (Fig. 3, B).

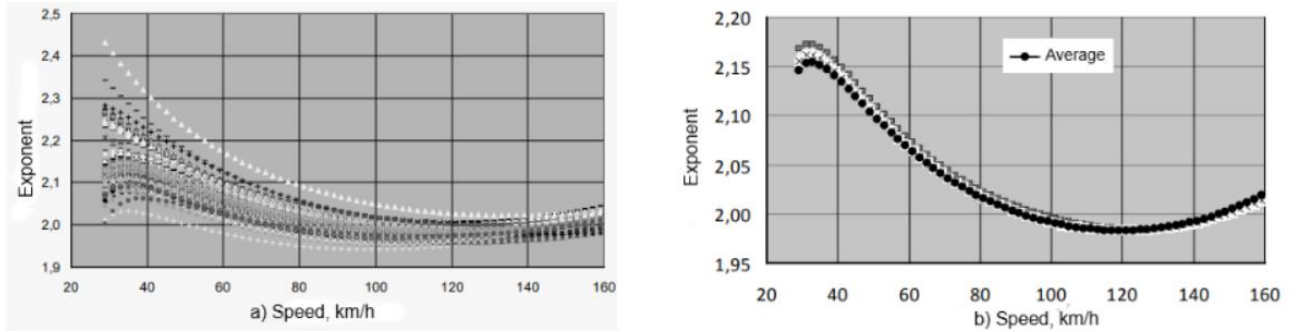


Fig. 3. A) Variation in the calculated dependence $\alpha(v)$ for different vehicles; B) Calculated dependencies $\alpha(v)$ by vehicle groups and average

Therefore, the exponent value was averaged for all vehicles. The resulting average curve practically coincides with the curve for the largest category. The section of the dependence in the speed range from 29 to 160 km/h is well approximated by a sixth-degree polynomial.

$$\begin{aligned} n = & -1,074 \cdot 10^{-12} \cdot V^6 + 6,596 \cdot 10^{-10} \cdot V^5 - \\ & 1,628 \cdot 10^{-7} \cdot V^4 + 2,053 \cdot 10^{-5} \cdot V^3 - \\ & 1,359 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + 4,101 \cdot 10^{-2} + 1,719 \end{aligned} \quad (4)$$

The variable exponent was then included in the generally accepted aerodynamic drag formula, and the difference between theoretical and experimental drag values for several examples was calculated using the adjusted model.

As the diagrams in Figure 4 show, this difference was significantly reduced—by a factor of 9 for the Mazda 6 and by a factor of 7 for the Ford C-Max.

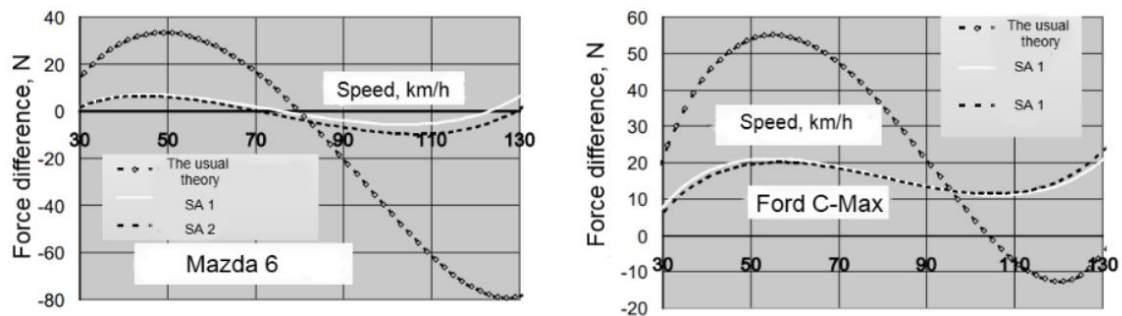


Fig. 4. Discrepancy between experimental and theoretical values of the drag forces of a passenger car when calculated using conventional theory, using a model with variable $\alpha(v)$ for a given category (SA 1), and using an overall average $\alpha(v)$ for all categories (SA 2)

CONCLUSIONS

The final decision on whether to consider the C_x coefficient or the velocity exponent α as the variable should rest with aerodynamicists. Any aerodynamic test can, with virtually no additional cost,

simultaneously record airflow velocity and air resistance after the fan is turned off. Analyzing large volumes of such data will deepen our theoretical understanding of the process.

For automotive and transportation engineers, as well as specialists in applied automotive science, practical certainty is important. In this context, the most convenient option is to use a constant C_x coefficient for a specific vehicle and a variable α exponent for all vehicles.

Factor analysis revealed that the main discrepancies between the calculated and experimental values of drag force in the speed range of 30–160 km/h are primarily due to the imperfections of the mathematical model of aerodynamic drag in laminar-turbulent flow around a vehicle. The influence of the other factors considered was significantly weaker.

Based on the conducted research, an empirical relationship was derived that allows for the calculation of a correction to the standard calculation of the resistance forces to vehicle movement at the specified speeds.

The average dependence of the exponent α in the aerodynamic drag formula on speed, $\alpha(v)$, was estimated and approximated. Calculations taking variable α into account reduced the discrepancies between calculated and experimental values of the drag force during vehicle coasting by a factor of 5-10, indirectly confirming the hypothesis of the variability of the exponent α .

Moreover, the average dependence $\alpha(v)$ is virtually identical for different vehicle categories, although its variability remains significant within each category.

REFERENCES

1. Ballistic Coefficient vs. Bullet Shape / [Electronic resource]. Article access mode: <http://www.ada.ru/guns/ballistic/bc/drag.htm>
2. Passenger Car Motion Resistance / [Rabinovich E.Kh., Volkov V.P., Belogurov E.A., Svetlichny D.V.] // Collection. "Transport, Ecology – Sustainable Development." XVI Scientific and Technical Conference with International Participation. ECOVARNA '2010. Technical University of Varna. Department "Transport Engineering and Technology." pp. 529-535. May 20-22, 2010.
3. Kondratyev, E.A., Rabinovich, E.Kh. Empirical Formulas for Calculating Motion Resistance of a Passenger Car / Collection "Transport, Ecology – Sustainable Development." XVIII Scientific and Technical Conference with International Participation. ECOVARNA '2012. Technical University of Varna. Department "Transport Engineering and Technology." – 2012 (plan).
4. Rabinovich E.Kh., Road Diagnostics of Passenger Cars. / E.Kh. Rabinovich, V.P. Volkov, E.A. Belogurov, et al. – Kharkov; FLP Panov A.N., 2018. – 255 p.
5. Rabinovich Je.H. Opredelenie soprotivlenij dvizheniju avtomobilja metodom odnokratnogo vybega / Rabinovich Je.H., Kemalov Z.Je., Sosnovyj A.V. // Avtomobil'nyj transport : sb. nauch. trudov. — Kharkov : HNADU. – 2008. – Vyp. 22.– S. 46-48/
6. Govorushchenko N.Ya. Fuel economy and reduction of toxicity in motor transport. – M.: Transport, 1990. – 135 p.
7. Rabinovich Je.H. Ocenka koeficientov soprotivlenij dvizheniju avtomobilja po puti vybega / Rabinovich Je.H., Volkov V.P., Belogurov E.A. // Ukraïns'kij metrologichnij zhurnal. – 2010. – № 4. – S.47-52.

Ю.В. Зибцев, П.А. Ворошилов. Сили опору під час керування легковим автомобілем.

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями сили опору транспортного засобу в діапазоні 30–160 км/год пояснюється використанням постійного показника степеня, $\alpha = 2$, у формулі аеродинамічного опору. На основі дорожніх випробувань було отримано середнє значення залежності $\alpha(v)$ з мінімальним значенням $\alpha = 1,98$ на швидкості близько 120 км/год та максимальним значенням $\alpha = 2,15$ на швидкості близько 33 км/год. Включення змінної α зменшує розбіжність у 5–10 разів, підвищуючи точність моделювання та розрахунків витрати палива.

Факторний аналіз показав, що основні відмінності між розрахунковими та експериментальними силами зумовлені недосконалістю моделі аеродинамічного опору, особливо під час переходу від ламінарного до турбулентного потоку. Інші фактори — коливання транспортного засобу, коефіцієнт Н/В, передаточне число головної передачі та профіль шин — мають значно менший вплив. Аеродинаміка є найважливішим фактором: індекси C_x та $C_x \cdot F$ мають практично однаковий вплив.

Середнє значення залежності $\alpha(v)$ подібне для всіх категорій транспортних засобів, хоча значна мінливість залишається в межах кожної групи. Введення змінної α значно зменшує розбіжності між теорією та експериментом, що дозволяє здійснювати точніші розрахунки та прогнози динаміки

транспортного засобу. Це дозволяє інженерам коригувати обчислювальні моделі, враховувати реальні аеродинамічні ефекти під час проектування та оцінювати вплив швидкості на опір повітря. Цей підхід також забезпечує основу для оптимізації конструкції кузова та шасі, спрямованої на зменшення витрати палива та підвищення ефективності транспортного засобу в реальних умовах руху. Крім того, використання змінної α допомагає визначити критичні діапазони швидкостей, де опір повітря має найбільший вплив на динаміку транспортного засобу, і може служити відправною точкою для подальших досліджень щодо покращення аеродинаміки та енергоефективності транспортних засобів.

Ключові слова: автомобіль, колесо, опір, аеродинаміка, опір повітря.

ЗИБЦЕВ Юрій Васильович, інженер, старший викладач кафедри «Технічної експлуатації і сервісу автомобілів імені Говорущенко М.Я.» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: dandz2805@gmail.com.

ВОРОШИЛОВ Павло Андрійович, студент, спеціальність: автомобільний транспорт, автомобільний факультет Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: voropasha01@gmail.com.

Yuriy ZYBTSEV, senior lecturer engineer, Department «Technical operation and service of cars named after prof. Govorushchenko N.Ya.» Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: dandz2805@gmail.com.

Pavlo VOROSHYLOV, student, specialty: automobile transport, automotive faculty Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: voropasha01@gmail.com.

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/dwk5ew12>

Андрусенко С.І., Білецький В.О., Бугайчук О.С., Подпіснєв В.С.
Національний транспортний університет, Київ, Україна

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГНОСТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В МІСЬКОМУ АВТОПАРКУ ТАКСІ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АВТОМОБІЛІВ TESLA MODEL 3 ТА ŠKODA OCTAVIA A7

У статті визначена економічна ефективність впровадження системи прогностичного технічного обслуговування (PdM) на прикладі міського таксопарку, який використовує автомобілі Tesla Model 3 (електромобілі) та Škoda Octavia A7 (автомобілі з бензиновим двигуном).

Традиційне технічне обслуговування (ТО) за фіксованим графіком часто призводить до зайвих профілактичних витрат та несподіваних простоїв через раптові відмови. Впровадження систем PdM, що базуються на IoT-датчиках, телеметрії та аналізі даних за допомогою штучного інтелекту (AI), дозволяє скоротити витрати на ТО автомобілів і підвищити їх безвідмовність. Для інтенсивної експлуатації міського таксопарку порівняння традиційної та прогностичної моделей є критично важливим.

Системи PdM збирають безперервні телематичні дані (температура, тиск, вібрації, стан батареї). У автомобіля Tesla Model 3 дані збираються штатною електронікою, тоді як у автомобіля Škoda Octavia A7 можуть застосовуватися зовнішні OBD-II-адаптери. Зібрана інформація обробляється в хмарі, де алгоритми машинного навчання виявляють аномалії та прогнозують потенційні відмови. У Tesla бортовий комп'ютер (FSD/автопілот) формує потоки телеметрії, які через захищений зв'язок надходять у хмару, де відбувається тренування ML-моделей (на суперкомп'ютері Tesla Dojo чи хмарних GPU). Оновлені діагностичні алгоритми доставляються назад на автомобілі через OTA-оновлення. Це дозволяє виявляти ненормальні патерни роботи вузлів, запобігаючи аварійним зупинкам і навіть дистанційно вирішуючи дрібні проблеми.

Порівняльний аналіз стратегій технічного обслуговування показав:

- регламентне ТО має середній ризик непланових простоїв і високі витрати;
- реактивне ТО характеризується максимальними простоями та високими витратами на екстрений ремонт;
- прогностичне ТО мінімізує непланові простой та знижує витрати на обслуговування на 18 – 25 %.

Впровадження PdM призводить до значної економії на ТО, скорочення простоїв та подовження ресурсу.

Ключові слова: автомобільний транспорт, таксі, прогностичне обслуговування, ефективність експлуатації, рентабельність інвестицій.

ВСТУП

Розвиток технологій електромобілів, бортової телематики та аналітики даних відкриває нові можливості для модернізації технічного обслуговування автотранспорту. Традиційне обслуговування за жорстким графіком часто призводить до зайвих витрат на профілактику та несподіваних простоїв у разі раптової відмови. Згідно з дослідженнями, впровадження систем прогностичного технічного обслуговування (PdM) дозволяє скоротити витрати на ТО автомобілів до 12 – 30 % та підвищити їх безвідмовність [1, 2]. У контексті міського таксопарку, де експлуатація автомобілів є інтенсивною, особливо важливо порівняти традиційні та прогностичні моделі обслуговування. У цій роботі проведено технічний аналіз систем PdM і розраховано економічну ефективність їх застосування на прикладі автопарку з 50 автомобілів Tesla Model 3 (електромобілі) та 50 автомобілів Škoda Octavia A7 (з бензиновим двигуном), кожен з яких проїжджає 30 000 км на рік.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз відомих нам публікацій показав, що існують наступні технічні засоби та методи прогностичного технічного обслуговування (Predictive Maintenance – PdM). Системи PdM базуються на безперервному зборі телематичних даних і їх аналізі за допомогою штучного інтелекту.

Ключовими компонентами є:

- IoT-датчики та телеметрія: бортові датчики вимірюють критичні параметри (температуру двигуна, тиск у шинах, рівень вібрацій тощо) [2, 3]. У Tesla Model 3 багато даних збирається штатною електронікою (BMS, автопілотні сенсори), тоді як у Škoda Octavia A7 можуть застосовуватися OBD-II-адаптери і зовнішні телематичні пристрої.

- Аналіз даних та штучний інтелект (AI): зібрані дані відправляються в хмару, де алгоритми машинного навчання виявляють аномалії та прогнозують відмови. AI-моделі навчаються на історичних даних, визначаючи шаблони деградації компонентів [3]. Наприклад, на основі зміни

витрати палива або незвичної температурної кривої може бути попереджено про необхідність планової заміни деталей.

- Цифрові двійники і візуалізація: деякі PdM-системи створюють цифрові двійники автомобілів для симуляції їхнього стану. Інтерфейси та дашборди дозволяють менеджерам автопарку оперативно реагувати на прогнози відмов та планувати обслуговування з мінімальними втратами.

Технічна архітектура прогностичного обслуговування Tesla.

Архітектура передачі та обробки даних у Tesla наведена на рис 1.

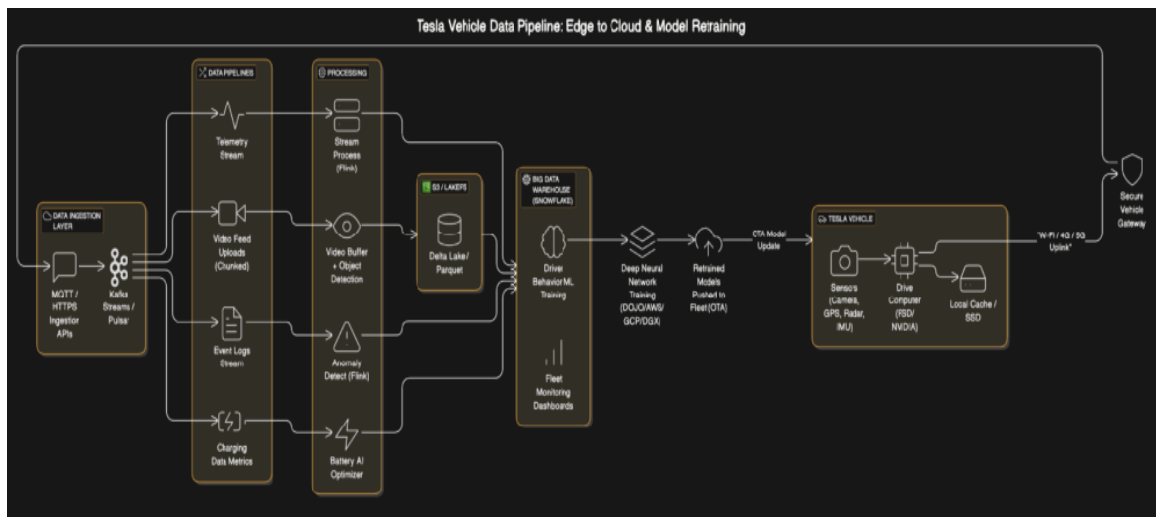


Рисунок 1 – Архітектура передачі та обробки даних у Tesla [4]

Бортові сенсори і комп'ютери формують потоки телеметрії, які через захищений зв'язок надходять у хмару для аналізу та оновлення ПЗ. Автомобілі Tesla діють як рухомі центри збору даних. Вони постійно передають у хмару детальну телеметрію (швидкість, прискорення, координати, стан батареї) [4] та показники з численних сенсорів (датчики двигуна, гальм, тиску у шинах, температури тощо) [5]. Бортовий комп'ютер (апаратне забезпечення FSD/автопілот) обробляє ці дані й тимчасово зберігає журнали на локальному SSD [6]. Після цього зашифровані пакети телеметрії і подій передаються по мобільній мережі до серверів Tesla [7].

У хмарі дані приймаються через стрімінгові інтерфейси (Kafka/Pulsar) і одразу обробляються (Apache Flink) для фільтрації та виявлення аномалій (наприклад, рекурентних збоїв у гальмівній системі) [7]. Усі потоки надходять до «сховище даних» (AWS S3) та аналітичних сховищ (BigQuery/Snowflake) для детального аналізу. Там же відбувається тренування ML-моделей (на суперкомп'ютері Tesla Dojo чи хмарних GPU) на основі зібраних даних. Після навчання оновлені моделі та діагностичні алгоритми доставляються назад на автомобілі через OTA-оновлення з можливістю відкату параметрів [7].

Механізми прогнозування та виявлення несправностей.

Tesla застосовує алгоритми машинного навчання та аналіз поточних даних для раннього виявлення дефектів. Бортові сенсори й телеметрія дають інформацію про роботу батареї, двигуна, гальм тощо, а AI-моделі навчені виявляти ненормальні патерни. Наприклад, якщо сенсор фіксує нетипову вібрацію двигуна, система розцінює це як потенційну проблему і може попередити про наближення поломки [8]. Інформація з усього автопарку Tesla агрегується – це дозволяє знаходити закономірності навіть у рідкісних випадках відмов [8]. При виявленні аномалії система відсилає сповіщення водієві з рекомендацією звернутися в сервіс [5]. Дрібні проблеми іноді вирішуються віддалено: автомобіль Tesla може провести діагностику та оновити прошивку «по повітрю», зменшуючи потребу візиту до сервісного центру [9].

Порівняння ефективності підходів обслуговування.

Таблиця 1 – Порівняння різних стратегій обслуговування

Критерій	Регламентне (планове) обслуговування	Прогностичне обслуговування (Tesla)	Реактивне обслуговування
Принцип	Фіксовані інтервали за пробігом/часом	Обслуговування за станом вузлів (аналіз)	Тільки після поломки

Критерій	Регламентне (планове) обслуговування	Прогностичне обслуговування (Tesla)	Реактивне обслуговування
		даних)	
Дані для діагностування	Мінімальні (перевірка по документації)	Безперервна телеметрія та сенсори	Тільки явні симптоми та аварії
Непланові простої	Середні (можливі поломки між ТО)	Низькі (більшість поломок запобігаються)	Максимальні (аварійні зупинки)
Витрати на обслуговування	Високі (некритичні ремонти за графіком)	На 18 – 25 % менші (за оцінками) [10]	Високі (екстрені ремонти)
Ресурс автомобілів	Середній (заміна компонентів «про запас»)	Максимальний (повне використання ресурсу) [5]	Найнижчий (деталі зношуються до відмови)
Задоволеність клієнта	Низька (збої у міжсервісний період, незручний графік)	Висока (менше аварій, зручне інформування) [9]	Дуже низька (непередбачувані поломки)

Традиційні методи мають суттєві недоліки. Регламентне обслуговування за графіком часто призводить як до передчасної заміни деталей, так і до відмов між плановими візитами [9]. Реактивний підхід (ремонт після поломки) викликає довгі простої й високі витрати на аварійний ремонт [11]. Прогностичне ж обслуговування виконує ремонт точно за потребою, що мінімізує непланові зупинки [11]. За оцінками, перехід на прогностичну стратегію знижує витрати на обслуговування на 18 – 25 % і скорочує незаплановані простої до ~ 50 % [10]. У результаті кількість аварійних відмов автомобілів суттєво падає. Так, запровадження AI-моделі прогнозування дало Tesla зменшення незапланованих простоїв виробництва на понад 30% і скорочення витрат на ~20 – 25 % [12]. Крім того, Tesla відмічає зниження навантаження на свої сервісні центри – частина поломок усувається дистанційно, а власники отримують своєчасні повідомлення про необхідність обслуговування [9].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є визначення економічної ефективності впровадження прогностичного технічного обслуговування на прикладі міського автопарку таксі, який використовує автомобілі Tesla Model 3 та Škoda Octavia A7 в Німеччині та Україні.

Задачами дослідження є проаналізувати існуючі PdM-технології, порівняти їх з традиційними стратегіями технічного обслуговування, виконати економічне моделювання витрат на технічне обслуговування автопарку за обома підходами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Економічна оцінка ефективності PdM.

Для оцінки економічного ефекту розглянемо уявний приклад міського таксопарку з двох груп по 50 автомобілів: Tesla Model 3 (електромобілі) та Škoda Octavia A7 (бензинові) в Європі. Кожен автомобіль проїжджає приблизно 30 000 км на рік (інтенсивні міські умови).

Використаємо такі вихідні дані:

Річні витрати на ТО (без PdM): за даними CarEdge, приблизні витрати на ТО Tesla Model 3 за 10 років – 3258 \$ [13] (≈ 326 \$ / рік), що значно нижче середніх показників класу. Для Škoda Octavia A7 річні витрати на сервіс складають близько 476 £ (~ 620 \$) [14]. Беремо приблизно 400 \$ / рік для Tesla та 600 \$ / рік для Škoda.

Частота аварійних поломок (без PdM): у міському режимі прийемо 1 аварійна поломка на рік на Škoda та 0,5 – на Tesla (менш складна конструкція EV). Вартість усунення однієї аварії (евакуація та ремонт) візьмемо орієнтовно 460 \$.

Ефект PdM: на основі вищенаведених досліджень очікуємо, що PdM знизить кількість поломок на ≈ 75 % і скоротить витрати на ТО на ≈ 30 % [1, 2].

Інвестиції в PdM: передбачимо початкові капітальні витрати 300 \$ на автомобіль (датчики, обладнання, встановлення), тобто 15000 \$ на кожну групу (Tesla/Škoda), а також мінімальні річні операційні витрати.

Для оцінки використаємо такі показники, як:

ROI (Return on Investment) зазвичай обчислюють як відношення чистого прибутку (витрат) до вкладених інвестицій.

ROI можна формулювати як

$$ROI = \frac{\text{Чистий прибуток (вигода) від інвестиції}}{\text{Сума інвестицій}}, \quad (1)$$

де: чистий прибуток – це різниця між вигодами і витратами.

На основі цих даних проведемо підсумкові розрахунки (табл. 2).

Таблиця 2 – Економічна модель для таксопарків з 50 автомобілів (30 000 км/рік)

Показник	Tesla Model 3 (50 од.)	Tesla Model 3 (PdM)	Skoda Octavia A7 (50 од.)	Skoda Octavia A7 (PdM)
Витрати на ТО, \$/рік (загалом)	20 000	14 000	30 000	21 000
Кількість аварійних поломок на рік	25 (0,5×50)	6,25	50	12,5
Витрати на аварійні ремонти, \$/рік	11 500 (25×460)	2 875 (6,25×460)	23 000 (50×460)	5 750 (12,5×460)
Загальні витрати на обслуговування, \$/рік	31 500	16 875	53 000	26 750
Щорічна економія, \$	–	14 625	–	26 250
ROI за перший рік, %	–	≈ 98%	–	≈ 175%
Термін окупності, рік	–	≈ 1,0	–	≈ 0,6

За оцінками (див. табл. 2), впровадження PdM дозволяє зменшити річні витрати таксопарку Tesla з 31500 \$ до 16875 \$, а Škoda – з 53000 \$ до 26750 \$. Тобто, річна економія складає приблизно 14625 \$ для Tesla і 26250 \$ для Skoda. За початкових інвестицій 15000 \$ у кожен групу це дає ROI ≈ 98 % (Tesla) і ≈ 175 % (Škoda) вже за перший рік; термін окупності вкладень – близько 1,0 і 0,6 року відповідно. Такі результати відповідають опублікованим даним про високу ефективність PdM у таксопарках [1, 2]. Крім того, слід відзначити, що Tesla завдяки конструкції EV має вищу початкову надійність і нижчі базові витрати на ТО [13, 15], що також сприяє кращим показникам ефективності.

Розглянемо більш детально розрахунок економічної ефективності прогностичного обслуговування таксопарку з автомобілями Škoda Octavia A7 на прикладі м. Києва.

Автопарк: 50 автомобілів Škoda Octavia A7, рік випуску – сучасний (технологічний), що експлуатуються в умовах м. Києва.

Пробіг: 30 000 км/рік на автомобіль ⇒ загальний пробіг парку ≈ 1 500 000 км/рік.

Витрати на ТО/ремонт (традиційні): пріоритетно складаються з планових (ТО-1, ТО-2 згідно регламенту) та аварійних робіт. Для приблизного прикладу візьмемо (з урахуванням цін м. Києва для середнього класу авто) витрати ~ 30 000 грн/рік на автомобіль (загалом 1,5 млн грн на рік для усього парку). Ця сума включає вартість запчастин і роботи.

Втрати від простоїв: незапланований простій призводить до втрати виручки. За оцінками з різних джерел, у м. Києві 1 година простою коштує ≈ 200 грн (втрачена виручка). При 8-годинному робочому дні це ~ 1600 грн/день. На основі цих даних розраховуються витрати для двох сценаріїв – «традиційний» та «прогностичний».

Крок 1: Витрати на традиційне обслуговування

Планові ТО: за регламентом автомобілів Škoda Octavia A7 в місті (ТО-1 кожні ~ 15 тис. км, ТО-2 кожні ~ 30 тис. км), кожний автомобіль отримує приблизно по дві-три сервісні процедури на рік.

Незаплановані ремонти: включають ремонтні роботи через виявлені несправності під час експлуатації. При річному пробігу 30 000 км приблизно 2 – 3 ремонти середньої вартості можуть статися на рік.

Загальні витрати на ТО і ремонт: сумуємо планові та аварійні витрати:

$$C_{\text{традиц}} = N_{\text{авто}} \times (C_{\text{ТО, план}} + C_{\text{ремонт}}). \quad (2)$$

де: $C_{\text{трад}}$, $C_{\text{ТО, план}}$, $C_{\text{ремонт}}$ – відповідно сукупна вартість ТО та ремонтів, вартість планових ТО, вартість ремонтів за період.

Для прикладу: оберемо $N_{\text{авто}} = 50$, $C_{\text{ТО, план}} + C_{\text{ремонт}} \approx 30\,000$ грн.

Якщо планові ТО коштують $\sim 10\,000$ грн, а середні ремонти $\sim 20\,000$ грн на рік на автомобіль, то $C_{\text{традиційне}} \approx 30\,000$ грн/авто-рік, а для всього автопарку в 50 автомобілів це складе $\sim 1,5$ млн грн/рік.

Втрати від простоїв (традиційні): визначаємо сумарні години незапланованого простою всього автопарку на рік (наприклад, у середньому 100 – 200 год/авто-рік) та оцінюємо в грошовому виразі:

$$\text{Втрати}_{\text{традиц}} = N_{\text{авто}} \times H_{\text{простоїв (традиц)}/\text{рік}} \times \text{Втрати}/\text{год}. \quad (3)$$

Згідно з галузевими оцінками, 1 год. простою можна оцінити приблизно у 200 грн. Наприклад, при 150 год/рік на автомобіль $200 \times 150 = 30\,000$ грн /авто-рік або 1,5 млн грн на весь автопарк.

Загальні витрати-втрати при традиційному обслуговуванні $C_{\text{трад}} = 1,5 + 1,5 = 3$ млн грн.

Крок 2: Витрати при впровадженні прогностичного ТО автомобілів

Планове обслуговування: в системі прогностичного ТО автомобілів багато стандартних перевірок виконуються рідше або цілком замінюються діагностуванням «за станом». Згідно з даними, впровадження таких рішень дає економію на сервісному обслуговуванні, може скласти $\sim 20\%$ [2].

Тому можна взяти $C_{\text{ТО, план}}^{\text{нове}} \approx 0,8 \times C_{\text{ТО, план}}$.

Аварійні роботи: системи контролю сигналізують про потенційні відмови заздалегідь, тож кількість серйозних поломок значно падає (на 30 – 50 %) [16]. Тому $C_{\text{ремонт}}^{\text{нове}}$ буде приблизно на 30 – 50 % меншим.

Загальні витрати:

$$C_{\text{прогноз}} = N_{\text{авто}} \times (0,8 C_{\text{ТО, план}} + 0,5 C_{\text{ремонт}}), \quad (4)$$

де: 0,8 та 0,5 – умовні коефіцієнти зниження (для прикладу).

Наприклад,

$$C_{\text{прогноз}} \approx 50 \times (0,8 \cdot 10\,000 + 0,5 \cdot 20\,000) = 50 \times (8\,000 + 10\,000) = 50 \times 18\,000 = 900\,000$$

Всього загальні витрати на ТО та ремонти автомобілів 900 000 грн/рік.

Втрати від простоїв (прогностичні): у прогностичному ТО непередбачувані зупинки скорочуються приблизно на 30 – 50% [16], а техобслуговування можна планувати в зручний час. Припустимо, відбулося на 40 % зменшення годин простою H : тоді $H_{\text{простоїв, прогност}} = 0,6 \times H_{\text{простоїв, традиц}}$, що зменшує річні простої з 150 год до 90 год/авто-рік. Таким чином, втрати від простою 50 автомобілів стануть $0,6 \times 30\,000 \times 50 = 900\,000$ грн/рік.

Загальні витрати при прогностичному обслуговуванні $C_{\text{прогн}} = 900\,000 + 900\,000 = 1,8$ млн грн.

Подовження ресурсу: завдяки точному інтервалу обслуговування зменшується зношення, а також своєчасно усуваються проблеми з підбором несправностей. Наприклад, за даними McKinsey, термін служби обладнання в умовах прогностичного ТО може зрости на 20 – 40 % [16]. Для нашого автопарку це означає, що заміна чи капремонт автомобіля (середній термін – 5 років) відкладається приблизно на 1 – 2 роки. У фінансовому розрахунку це збільшує сумарну корисну роботу кожного автомобіля на 20 – 40 %, що еквівалентно економії амортизаційних витрат. Наприклад, якщо автомобіль коштує $\sim 700\,000$ грн, то продовження терміну служби на 1 рік (з 5 до 6 років) дає заощадження $\sim 24\,000$ грн річної амортизації на автомобіль ($700\,000/6 - 700\,000/5 \approx -24\,000$). Для 50 автомобілів – $\sim 1,2$ млн грн «економії ресурсу» щорічно.

Крок 3: Розрахунок економії та фінансовий ефект

Порівнюючи результати, маємо:

- Економія на ТО та Р:

$$\Delta C_{\text{ТО}} = C_{\text{традиц}} - C_{\text{прогноз}}. \quad (5)$$

За наведеними прикладами: $1,500,000 - 900,000 = 600,000$ грн/рік.

- Економія від скорочення простоїв:

$$\Delta D = \text{Втрати}_{\text{традиц}} - \text{Втрати}_{\text{прогноз}} \quad (6)$$

Наприклад, 1,5 млн грн - 0,9 млн грн = 600000 грн.

Це головні статті вигоди.

- Економія за рахунок подовження ресурсу: приблизно 1,2 млн грн відкладеної амортизації щорічно.

Загальна вигода від впровадження прогностичного обслуговування дорівнює

$$\text{Вигода} = 3 \text{ млн грн} - 1,8 \text{ млн грн} + 1,2 \text{ млн грн} = 2,4 \text{ млн грн}.$$

Фінансовий ефект: сукупне щорічне скорочення витрат $\approx 2,4$ млн грн для автопарку. Інвестиції в систему прогностичного ТО (обладнання, ПЗ, сервіс) треба порівнювати з цією економією.

Припустимо, вартість впровадження складає 1 млн грн (20 тис. грн/авто). Тоді ROI (рентабельність інвестицій) за перший рік оцінюється як

$$\text{ROI} = \frac{\text{вигода} - \text{витрати}}{\text{витрати}} \times 100\%. \quad (7)$$

За нашими цифрами: на перший рік

$$\text{ROI} = (2,4 - 1) / 1 = 1,4 \times 100\% = 140 \ %.$$

Тобто інвестиції в прогностичне обслуговування окупляться менше ніж за рік.

Багато джерел вказують, що проєкт прогностичного ТО часто окупається протягом 1 – 2 років [2, 16]. Зокрема, відомі кейси показують співвідношення вигоди до витрат у діапазоні 10:1 – 30:1 (1000 – 3000 %) за 1 – 1,5 роки [16].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У результаті дослідження показано, що системи прогностичного технічного обслуговування автомобілів з використанням сенсорів IoT і AI-алгоритмів можуть значно підвищити ефективність управління автопарком. У порівнянні з традиційним превентивним ТО, PdM-стратегії дозволяють скоротити ризик аварійних відмов і простоїв до $\approx 70 - 75 \ %$ і $35 - 45 \ %$ відповідно [1], що призводить до суттєвої економії коштів. Зокрема, аналіз фінансових показників для міського таксопарку з 50 автомобілів Tesla Model 3 і 50 автомобілів Škoda Octavia A7 виявив, що впровадження PdM може зменшити сумарні річні витрати на технічне обслуговування майже вдвічі. При цьому електромобілі Tesla мають низькі базові витрати на обслуговування [13], а система PdM додатково підвищує їх безвідмовність і ефективність. Для таксопарку автомобілів Škoda, переваги PdM виражаються ще більшим відносним приростом ефективності через вищі початкові витрати на ТО. Загалом, результати підтверджують вигідність інвестування в PdM: за отриманими розрахунками термін окупності менше 1 року, а ROI дорівнює від 1 до 1,75 (100 – 175 %) у залежності від цін у країні, де проводиться аналіз, та врахування або не врахування зменшення амортизаційних відрахувань.

ВИСНОВКИ

Подальші дослідження в цій області можуть бути спрямовані на уточнення моделі оцінки ефективності PdM з урахуванням капітальних витрат на IT-інфраструктуру та амортизації, а також на використання цифрових двійників і глибинних нейромереж для підвищення точності прогнозів. Показники реалізованих стратегій (економія витрат, коефіцієнт окупності, час окупності та інші) дозволяють чітко оцінити прибутковість PdM-проєктів і порівняти їх для різних платформ (електромобілі vs автомобілі з ДВЗ).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. URL: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/>.

- 2.The importance of predictive maintenance in fleet operations | Prolius. URL: <https://www.prolius.com/news/predictive-maintenance>.
- 3.Predictive Maintenance for Fleet Management Using AI and IoT. URL: <https://www.xenonstack.com/blog/predictive-maintenance-for-fleet-management>.
- 4.Tesla Vehicle Data Pipeline: Architecture of a Smarter Car. URL: <https://code2deploy.com/blog/tesla-vehicle-data-pipeline-architecture-of-a-smarter-car/>.
5. Role of Automotive Data Solutions in Tesla's Innovation and Success. URL: <https://www.promptcloud.com/blog/tesla-approach-to-automotive-data-solutions/>.
- 6.Tesla's Use of Data to Innovate in the Auto Industry: What Manufacturers Can Learn. URL: <https://www.promptcloud.com/blog/tesla-approach-to-automotive-data-solutions/>.
- 7.Tesla Vehicle Data Pipeline: Architecture of a Smarter Car – DevOps. URL: <https://code2deploy.com/blog/tesla-vehicle-data-pipeline-architecture-of-a-smarter-car/>.
- 8.How Tesla and BMW Use AI-Driven Predictive Maintenance to Reduce Downtime. URL: <https://www.cleverence.com/articles/business-blogs/how-tesla-and-bmw-use-ai-driven-predictive-maintenance-to-reduce-downtime/>.
- 9.The Impact of Predictive Maintenance on Automotive After-Sales Services | Hicron Software. URL: <https://hicronsoftware.com/blog/impact-of-predictive-maintenance-on-automotive-after-sales-services/>.
- 10.Predictive Maintenance: Cutting Costs & Downtime Smartly. URL: <https://www.iiot-world.com/predictive-analytics/predictive-maintenance/predictive-maintenance-cost-savings/>.
- 11.Reactive Vs. Preventive Vs. Predictive Maintenance | Prometheus Group. URL: <https://www.prometheugroup.com/resources/posts/reactive-vs-preventive-vs-predictive-maintenance>.
- 12.How Tesla and BMW Slashed Downtime Using Predictive Maintenance in 2025 – News. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/news/how-tesla-and-bmw-slashed-downtime-using-predictive-maintenance-in-2025>.
- 13.Tesla Model 3 Maintenance Schedule and Costs. URL: <https://caredge.com/tesla/model-3/maintenance>.
- 14.Vw Audi Seat Skoda Maintenance Costs. URL: <https://www.whocanfixmycar.com/advice/vw-audi-seat-skoda-maintenance-costs>.
- 15.Electric vs. Gas Cars: Is It Cheaper to Drive an EV? URL: <https://www.nrdc.org/stories/electric-vs-gas-cars-it-cheaper-drive-ev#gas>.
- 16.How Predictive Maintenance Drives Cost Savings - WorkTrek. URL: <https://worktrek.com/blog/predictive-maintenance-cost-savings/>.

REFERENCES

- 1.How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. URL: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/>.
- 2.The importance of predictive maintenance in fleet operations | Prolius. URL: <https://www.prolius.com/news/predictive-maintenance>.
- 3.Predictive Maintenance for Fleet Management Using AI and IoT. URL: <https://www.xenonstack.com/blog/predictive-maintenance-for-fleet-management>.
- 4.Tesla Vehicle Data Pipeline: Architecture of a Smarter Car. URL: <https://code2deploy.com/blog/tesla-vehicle-data-pipeline-architecture-of-a-smarter-car/>.
5. Role of Automotive Data Solutions in Tesla's Innovation and Success. URL: <https://www.promptcloud.com/blog/tesla-approach-to-automotive-data-solutions/>.
- 6.Tesla's Use of Data to Innovate in the Auto Industry: What Manufacturers Can Learn. URL: <https://www.promptcloud.com/blog/tesla-approach-to-automotive-data-solutions/>.
- 7.Tesla Vehicle Data Pipeline: Architecture of a Smarter Car - DevOps. URL: <https://code2deploy.com/blog/tesla-vehicle-data-pipeline-architecture-of-a-smarter-car/>.
- 8.How Tesla and BMW Use AI-Driven Predictive Maintenance to Reduce Downtime. URL: <https://www.cleverence.com/articles/business-blogs/how-tesla-and-bmw-use-ai-driven-predictive-maintenance-to-reduce-downtime/>.
- 9.The Impact of Predictive Maintenance on Automotive After-Sales Services | Hicron Software. URL: <https://hicronsoftware.com/blog/impact-of-predictive-maintenance-on-automotive-after-sales-services/>.

10. Predictive Maintenance: Cutting Costs & Downtime Smartly. URL: <https://www.iiot-world.com/predictive-analytics/predictive-maintenance/predictive-maintenance-cost-savings/>.
11. Reactive Vs. Preventive Vs. Predictive Maintenance | Prometheus Group. URL: <https://www.prometheusgroup.com/resources/posts/reactive-vs-preventive-vs-predictive-maintenance>.
12. How Tesla and BMW Slashed Downtime Using Predictive Maintenance in 2025 – News. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/news/how-tesla-and-bmw-slashed-downtime-using-predictive-maintenance-in-2025>.
13. Tesla Model 3 Maintenance Schedule and Costs. URL: <https://caredge.com/tesla/model-3/maintenance>.
14. Vw Audi Seat Skoda Maintenance Costs. URL: <https://www.whocanfixmycar.com/advice/vw-audi-seat-skoda-maintenance-costs>.
15. Electric vs. Gas Cars: Is It Cheaper to Drive an EV? URL: <https://www.nrdc.org/stories/electric-vs-gas-cars-it-cheaper-drive-ev#gas>.
16. How Predictive Maintenance Drives Cost Savings - WorkTrek. URL: <https://worktrek.com/blog/predictive-maintenance-cost-savings/>.

S. Andrusenko, V. Biletskyi, O. Buhaichuk, V. Podpisnov. Economic efficiency of implementation of predictive maintenance in the city taxi fleet: comparative analysis of Tesla Model 3 and Škoda Octavia A7.

This article determines the cost-effectiveness of implementing a predictive maintenance (PdM) system using the example of a city taxi fleet that uses Tesla Model 3 (electric cars) and Škoda Octavia A7 (gasoline cars).

Traditional maintenance (MOT) on a fixed schedule often leads to unnecessary preventive costs and unexpected downtime due to sudden breakdowns. The implementation of PdM systems based on IoT-sensors, telemetry and data analysis using artificial intelligence (AI) allows you to reduce maintenance costs and increase the reliability of equipment. For intensive operation in an urban taxi fleet, the comparison of traditional and predictive models is critical Important.

PdM systems collect continuous telematics data (temperature, pressure, vibrations, battery status). For example, in the Tesla Model 3, data is collected by standard electronics, while for the Skoda Octavia, external OBD-II adapters can be used, go to the cloud, where ML models are trained (on a Tesla Dojo supercomputer or cloud GPUs). The updated diagnostic algorithms are delivered back to the vehicles via OTA updates. This allows you to detect abnormal patterns of node operation, preventing emergency stops and even remotely solving minor problems.

A comparative analysis of service strategies showed:

1. Routine maintenance has an average risk of unplanned downtime and high costs (due to non-critical scheduled repairs).
2. Reactive maintenance is characterized by maximum downtime and high costs for emergency repairs.
3. Predictive maintenance minimizes unplanned downtime and reduces maintenance costs by 18–25 %.

The implementation of PdM results in significant savings on maintenance, reduced downtime and life extension.

Key words: road transport, taxi, predictive maintenance, operational efficiency, return on investment.

АНДРУСЕНКО Сергій Іванович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Національний транспортний університет e-mail: sergeandrusenko@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9914-0200>

БІЛЕЦЬКИЙ Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Національний транспортний університет e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-7235-6442>

БУГАЙЧУК Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Національний транспортний університет e-mail: bug_os@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0001-8646-6263>

ПОДПИСНОВ Владислав Сергійович, старший викладач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Національний транспортний університет e-mail: vpodpisnov@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-8583-1502>

Serhii ANDRUSENKO, Ph.D. in Technical Science, Professor, Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, Kyiv, National Transport University e-mail: sergeandrusenko@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9914-0200>

Volodymyr BILETSKIY, Ph.D. in Technical Science, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, Kyiv, National Transport University e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-7235-6442>

Oleksandr BUHAICHUK, Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, Kyiv, National Transport University e-mail: bug_os@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0001-8646-6263>

Vladyslav PODPISNOV, Senior Lecturer of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, Kyiv, National Transport University e-mail: vpodpisnov@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-8583-1502>

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/fpkdtn33>

Бодак М.В.

*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна***АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ЗБІЛЬШЕННЯ НАПРУГИ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДО 800 В**

У представленому дослідженні проведено ретельний аналіз стратегічного переходу автомобільної індустрії від традиційних 400-вольтових систем тягових акумуляторів до передових високовольтних архітектур рівня 800 В та вище. Актуальність роботи зумовлена глобальними викликами декарбонізації транспортного сектору та необхідністю пришвидшення перезарядки тягових батарей електромобілів шляхом скорочення часу заряджання. Детально розглянуто фізичні ліміти існуючих систем, де основним бар'єром виступають значні резистивні втрати, що призводять до надлишкового тепловиділення та вимагають використання масивних кабельних систем. Встановлено, що архітектура 400 В, попри свою економічну доцільність та розвинену базу сумісної інфраструктури, вичерпала потенціал для впровадження ультрашвидких зарядних протоколів, що робить перехід на підвищену робочу напругу технічно безальтернативним етапом еволюції сучасного електричного транспорту.

Досліджено, як подвоєння напруги дозволяє зменшити силу струму вдвічі при збереженні ідентичної потужності, що не лише мінімізує термічне навантаження на акумуляторні осередки, а й дозволяє знизити масу провідникових матеріалів на 20–30%.

Частина дослідження присвячена аналізу сумісності високовольтних транспортних засобів із наявною інфраструктурою та прогнозуванню подальшого розвитку галузі в напрямку систем 1200 В. Обґрунтовано, що інтеграція 800-вольтових систем у масовий сегмент електромобілів, попри вищу початкову собівартість SiC-компонентів, забезпечує значне підвищення загальної енергоефективності та конкурентоспроможності. Висновки роботи вказують на те, що майбутні проекти, створюють фундамент для остаточного витіснення автомобілів із ДВЗ завдяки досягненню паритету у швидкості заправки та енергетичній автономності.

Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, швидка зарядка, високовольтні архітектури, потужність, надійність.

ВСТУП

Стрімке зростання глобального ринку електромобілів (EV) як інструменту декарбонізації транспортного сектору супроводжується підвищеними вимогами споживачів до запасу ходу та швидкості заряджання батареї. Традиційні 400 В архітектури силових батарей на сьогодні досягли свого фізичного максимуму. Головною перешкодою для подальшого підвищення потужності заряджання в таких системах є необхідність пропорційного збільшення сили струму, що призводить до зростання теплових втрат, перегріву акумуляторних модулів та потреби у надмірно важких і дорогих кабельних системах. Незважаючи на очевидні переваги переходу до архітектур підвищеної напруги (800 В та вище), цей процес створює низку технічних та економічних викликів. По-перше, виникає гостра потреба у повній заміні кремнієвих напівпровідників на дорожчі компоненти з широкою забороненою зоною (SiC/GaN). По-друге, існуюча глобальна зарядна інфраструктура здебільшого не розрахована на рівні напруги понад 500 В, що потребує складних бортових систем перетворення енергії. По-третє, робота при високій напрузі висуває нові вимоги до електробезпеки та гальванічної ізоляції згідно з директивами ЄС.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю систематизації технічних рішень, що дозволяють збалансувати ефективність, вартість та швидкість заряджання електромобілів наступного покоління. Вирішення проблеми сумісності та оптимізації високовольтних систем є критично важливим для подальшої модернізації електромобілів та зменшення часу заряджання електромобілів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання оптимізації архітектури тягових батарей є об'єктом уваги провідних інженерних та наукових центрів. Дослідження [1] підкреслюють, що величина напруги є ключовим детермінантом продуктивності електромобілів, та відповідає глобальними цілями декарбонізації.

Особлива увага в роботах [2], [3] приділяється переходу від 400 В до 800 В вказують, що цей перехід став можливим завдяки прогресу в напівпровідниковій індустрії. Зокрема, використання компонентів на базі карбіду кремнію (SiC) дозволяє мінімізувати втрати на перемикання.

Енергоефективність високовольтних систем досліджувалася в роботі [4]. Автори математично довели зниження резистивних втрат при зменшенні сили струму. Питання термоменеджменту та довговічності батарей при надшвидкій зарядці висвітлені в роботі [5]. Автор акцентує увагу на тому, що архітектура 800 В дозволяє уникнути критичного перегріву осередків, що є головною проблемою 400-вольтових систем.

Проблематика зарядної інфраструктури та її готовності до стандартів 800 В і майбутніх 1200 В розглядається в публікації [6], а також у звітах Європейської Комісії [7], де встановлено регуляторні межі для обладнання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є проведення комплексного порівняльного аналізу архітектур тягових акумуляторних батарей із напругою 400 В та 800 В та визначення їхньої ефективності в умовах сучасного ринку електромобілів.

Завданнями дослідження є аналіз переваг та технологічних викликів що створюють 800 В архітектури електромобілів, аналіз сумісності електромобілів з 800 В архітектурою та зарядних станцій з напругою 400 В, аналіз імплементації даної технології в сучасних електромобілях.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Напруга акумулятора має безпосередній вплив на ефективність усієї енергосистеми електромобіля. Вищі рівні напруги дозволяють використовувати нижчий струм для досягнення заданої вихідної потужності.

Крім того, компоненти силової електроніки, такі як інвертори та перетворювачі, є ефективнішими при роботі з підвищеною напругою. Вони здатні працювати з меншими значеннями сили струму, що мінімізує втрати на перемикання [8]. Збільшення напруги акумулятора також дозволяє значно зменшити розмір і вагу електричних компонентів. Площа поперечного перерізу силових кабелів може бути мінімізована, що призводить до суттєвої економії ваги та коштів, особливо у системах заряджання високої потужності [4].

Акумуляторний блок на 400 В зазвичай складається з великої кількості літій-іонних елементів (комірок), з'єднаних послідовно (орієнтовно 96-108 штук). Кожен із цих елементів має номінальну робочу напругу близько 3,7 В.

Переваги 400 В архітектури:

- відсутність потреби у спеціалізованих високовольтних компонентах значно знижує витрати на виробництво та подальше технічне обслуговування;
- більшість сучасних громадських і житлових зарядних станцій підтримують системи 400 В, що гарантує легкість розгортання та експлуатації;
- розроблені для мінімальних втрат енергії, системи 400 В добре інтегруються з усталеними структурами управління енергією;
- робота при нижчих рівнях напруги генерує менше тепла в штатних режимах, що дещо спрощує контроль температури порівняно з екстремальними високовольтними рішеннями.

Основним недоліком систем 400 В є відносно повільніша швидкість заряджання порівняно з архітектурами вищої напруги. Оскільки потужність визначається добутком напруги на силу струму, вихідна потужність за своєю природою обмежена максимальним струмом. Збільшення напруги системи дозволяє знизити струми, які інакше були б обмежені термічними нормами та вимогами безпеки.

Хоча ємність акумулятора є головним фактором запасу ходу електромобіля, системна напруга впливає на те, наскільки ефективно енергія доставляється до двигуна. Високе постачання енергії в системах 400 В передбачає високе споживання струму, що призводить до збільшення розсіювання енергії та посилює вимоги до ефективного керування температурним режимом. Такі втрати та обмеження потужності помітні у електричних вантажівках, масивних позашляховиках.

800-вольтна архітектура акумуляторів ознаменувала значний прогрес у технології електромобілів, забезпечуючи вищу енергоефективність, швидше заряджання та оптимізовану передачу потужності. Ця архітектура вже реалізована у високопродуктивних електромобілях, таких як Porsche Taycan та Hyundai Ioniq 5, демонструючи свій потенціал для збільшення запасу ходу транспортних засобів та скорочення часу заряджання.

Системи 800 В використовують конфігурацію акумуляторної батареї з приблизно 200 елементами, з'єднаними послідовно, кожен з яких працює при номінальній напрузі 3,7 В. Подвоєння напруги відносно систем 400 В дозволяє знизити силу струму. Ці переваги дещо нівелюються тим, що системи 800 В вимагають спеціалізованої силової електроніки. Зокрема, йдеться про використання напівпровідників із карбіду кремнію (SiC) замість традиційного кремнію (Si) в інверторах. SiC-компоненти ефективніше працюють при високій напрузі, менше нагріваються, але суттєво збільшують вартість інвестицій у виробництво. Крім того, виробники повинні дотримуватися регуляторних стандартів, включаючи електробезпеку та відповідність електромережам згідно з директивами ЄС [9].

Однією з найважливіших переваг систем 800 В є здатність досягати значно вищих швидкостей заряджання. У системі 400 В забезпечення високої потужності вимагає більших провідників та більш надійного охолодження через вищу силу струм. Натомість система 800 В може видавати таку саму потужність із вдвічі меншим струмом. Це дозволяє використовувати тонші кабелі, покращує теплову ефективність і робить архітектуру 800 В ідеальною для ультрашвидких зарядних станцій, що видають 250 кВт і більше. Як результат, багато високопродуктивних електромобілів переходять на платформи 800 В, щоб виправдати очікування споживачів щодо скорочення часу простою при заряджанні електромобіля.

Терморегуляція є ключовим фактором в електромобілях, особливо в міру зростання рівнів напруги акумуляторів. Хоча системи вищої напруги зменшують резистивні втрати, вони також вимагають оптимізованих методів відведення тепла для підтримки експлуатаційної ефективності. Високовольтне заряджання (особливо при потужностях 250-350 кВт) впроваджує нові виклики в управлінні температурою, оскільки надзвичайно швидка передача енергії може призвести до ефектів локалізованого нагрівання всередині батарейного блоку. Ефективні стратегії охолодження, такі як інтегровані системи рідинного охолодження та використання матеріалів із фазовим переходом. Здатність підтримувати нижчі робочі температури знижує навантаження на матеріали акумулятора, пом'якшуючи деградацію ємності з плином часу [4].

Автомобіль використовує власний бортовий зарядний пристрій (On-Board Charger, OBC) для перетворення змінного струму (AC) з мережі на постійний струм (DC) для зберігання в батареї. Зарядка рівень 1 (Level 1) використовує стандартну побутову розетку (120 В у Північній Америці та 230 В у Європі). Через низьку потужність (1.5-2.2 кВт) процес займає від 10 до 40 годин. Це ідеально підходить для плагін-гібридів (PHEV) або нічного заряджання. Зарядка рівень 2 (Level 2) працює при вищій напрузі (від 230 В або 380 В). Потужність варіюється від 3.3 кВт до 22 кВт. Завдяки цьому EV може отримати повний заряд максимум за 4-8 годин. Це оптимальний вибір для щоденного використання та робочих місць.

При швидкому заряджанні постійним струмом (DC Fast Charging / Level 3) починається бортовий зарядний пристрій і подача постійного струму (DC) відбувається безпосередньо в батарею, що кардинально скорочує час процесу. Стандартна швидка зарядка (400–500 В) має потужність від 50 кВт до 150 кВт. Забезпечує заряджання до 80% за 30–80 хвилин. До основних світових стандартів належать CCS (Combined Charging System), GBT та мережа Tesla Supercharger.

Ультрашвидкісна зарядка (800 В та вище) розвивалась паралельно з створенням 800-вольтних батарей. Така зарядка здатна видавати потужність від 250 кВт і вище. Автомобілі (як-от Porsche Taycan) можуть поповнити заряд до 80% за 10–20 хвилин. Такі системи генерують менше тепла в кабелях станції через знижену силу струму.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На сьогодні існує низка відомих моделей електромобілів, які успішно використовують системи 800 В, це Audi e-tron GT, Porsche Taycan, Lucid Air (номінальна напруга ≈ 924 В), Chevy Silverado EV та сучасні моделі Hyundai/Kia. Високовольтна архітектура дозволяє цим автомобілям підтримувати швидке заряджання DC на рівнях до ≈ 300 –350 кВт.

Крім цього, компанія Ford також подала патенти на свої багаторівневі архітектури (до 1200 В). Хоча деякі прототипи суперкарів уже досліджували гібридні системи на 1200 В, їхнє широке комерційне використання і впровадження наразі виглядає перспективою віддаленого майбутнього.

ВИСНОВКИ

Швидкість заряджання становить головну відмінність між системами 400 В та 800 В. Хоча традиційні 400-вольтні системи широко застосовуються, вони використовують вищі сили струму, що генерує надлишкове тепло та знижує загальну ефективність. Заряджання до 80% для таких систем займає 30–60 хвилин. Натомість системи 800 В досягають аналогічного заряду всього за 10–20 хвилин завдяки зменшенню сили струму та втрат тепла, навіть при вищих рівнях потужності (250 кВт та вище).

Це робить архітектуру 800 В (та потенційно 1200 В) ідеальним рішенням для швидких подорожей на далекі відстані, кардинально покращуючи енергетичну ефективність транспорту та наближаючи час зарядки електромобіля до швидкості заправки автомобілів із двигунами внутрішнього згорання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Zhang L., Hu X. Efficiency analysis and optimization of 800V high-voltage battery systems for electric vehicles. Journal of Power Sources. 2021. Vol. 482. 229501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229501>.
- 2.Manthiram A. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. Nature Energy. 2020. Vol. 5, no. 7. P. 506–517. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0557-0>.
- 3.Berckmans G. et al. Cost and performance analysis of 800 V vs. 400 V electric vehicle drivetrains. World Electric Vehicle Journal. 2020. Vol. 11, no. 1. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj11010009>.
- 4.Zhang J., Wu G., Du J. Optimal energy management strategy for PHEVs with multi-voltage electrical systems. Applied Energy. 2019. Vol. 242. P. 883–895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.155>.
- 5.Yang X. G. et al. Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium-ion batteries. Nature. 2019. Vol. 575, no. 7781. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1685-z>.
- 6.Das H. S. et al. Electric vehicles in the smart grid: A review of vehicle-to-grid technologies and optimization techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 125. 109813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109813>.
- 7.Directive 2014/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits. Official Journal of the European Union. 2014. L 96. P. 357–374.
- 8.Zhang H., Ge B., Liu Y. Impact of SiC devices on the energy efficiency of electric vehicle drivetrains. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 68, no. 11. P. 10556–10567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3031541>.
- 9.Chen D. et al. A review of lithium-ion battery thermal management system with vapor compression refrigeration for electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 145. 111039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111039>.

REFERENCES

- 1.Zhang, L., & Hu, X. (2021). Efficiency analysis and optimization of 800V high-voltage battery systems for electric vehicles. Journal of Power Sources, 482, 229501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229501>.
- 2.Manthiram, A. (2020). A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. Nature Energy, 5(7), 506–517. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0557-0>
- 3.Berckmans, G., De Sloovere, B., Devriese, W., Schier, M., Smekens, J., Hegazy, O., & Van Mierlo, J. (2020). Cost and performance analysis of 800 V vs. 400 V electric vehicle drivetrains. World Electric Vehicle Journal, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/wevj11010009>
- 4.Zhang, J., Wu, G., & Du, J. (2019). Optimal energy management strategy for PHEVs with multi-voltage electrical systems. Applied Energy, 242, 883–895. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.155>
- 5.Yang X. G. et al. Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium-ion batteries. Nature. 2019. Vol. 575, no. 7781. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1685-z>.
- 6.Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2020). Electric vehicles in the smart grid: A review of vehicle-to-grid technologies and optimization techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 125, 109813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109813>
- 7.European Commission. (2014). Directive 2014/35/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits. Official Journal of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/35/oj>
- 8.Zhang, H., Ge, B., & Liu, Y. (2021). Impact of SiC devices on the energy efficiency of electric vehicle drivetrains. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(11), 10556–10567. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3031541>
- 9.Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Wang, A. (2021). A review of lithium-ion battery thermal management system with vapor compression refrigeration for electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111039>

M. Bodak. Analysis of the benefits of increasing the battery voltage of electric vehicles to 800 V

The presented study analyzes the strategic transition of the automotive industry from traditional 400-volt traction battery systems to advanced high-voltage architectures of 800 V and above. The relevance of

the work is due to the global challenges of decarbonization of the transport sector and the need to reduce charging times. The author examines in detail the physical limits of existing systems, where the main barrier is significant resistive losses (I^2R), which lead to excess heat generation and require the use of massive cable systems. It is established that the 400 V architecture, despite its economic feasibility and developed base of compatible infrastructure, has exhausted the potential for the implementation of ultra-fast charging protocols, which makes the transition to an increased operating voltage a technically unalternative stage in the evolution of modern electric transport.

The work places special emphasis on the technological transformation of the component base, in particular, on the transition from silicon semiconductors (Si IGBT) to wide-gap components based on silicon carbide (SiC). It is investigated how doubling the voltage allows to reduce the current strength by half while maintaining identical power, which not only minimizes the thermal load on the battery cells, but also allows to reduce the mass of conductive materials by 20–30%. Special attention is paid to innovative thermal management methods, including integrated liquid and immersion cooling systems, which ensure the stability of electrochemical processes and significantly slow down the degradation of battery capacity under conditions of ultra-high loads.

The final part of the study is devoted to the analysis of the compatibility of high-voltage vehicles with the existing infrastructure and the forecasting of the further development of the industry towards 1200 V systems. It is substantiated that the integration of 800 V systems into the mass segment of electric vehicles, despite the higher initial cost of SiC components, provides a significant increase in overall energy efficiency and competitiveness. The conclusions of the work indicate that future projects, such as the European ENLIGHTEN initiative, create the foundation for the final replacement of ICE cars by achieving parity in refueling speed and energy autonomy.

Key words: electric vehicle, battery, fast charging, high-voltage architectures, power, reliability.

БОДАК Максим Володимирович – викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>, email: bodak@lutsk-ntu.com.ua,

Maksym BODAK – Lecturer, Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>, email: bodak@lutsk-ntu.com.ua,

Дата надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

<https://doi.org/10.36910/0bpth191>

Вахнюк С.А.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***АНАЛІЗ ВІДОМИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВІДКЛЮЧЕННЮ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ ЗМЕНШЕННІ НАВАНТАЖЕНЬ НА АВТОМОБІЛЬ**

У статті на основі літературних джерел був проведений аналіз методів покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів, шляхом застосування в двигуні внутрішнього згоряння режиму відключення частини циліндрів, при забезпеченні надійності та функціональної стабільності колісних машин. Визначені проблеми в цьому питанні а також перспективи подальших досліджень.

Двигуни внутрішнього згоряння, що застосовуються на автомобільному транспорті працюють у постійно змінюваних навантажувальних режимах. При цьому більшість часу займають режими малих навантажень та ХХ. При цьому, номінальна потужність двигуна використовується лише частково.

Одним із альтернативних способів підвищення ефективності роботи багатоциліндрових двигунів, в режимі роботи на холостому ході та часткових навантажень, можна здійснити за рахунок регулювання навантаження зміною робочого об'єму двигуна шляхом відключення частини працюючих циліндрів.

В роботі розглянуті різні способи реалізації відключення циліндрів двигуна, які діляться на дві великі групи: це зупинка кривошипно-шатунного механізму (КШМ) (модульний ДВЗ) та відключення системи живлення.

Результати дослідження показали, що деактивація частини циліндрів шляхом плавного чи ступінчастого регулювання об'єму або модульного відключення частини циліндрів, за підрахунками дослідників цього питання, призводить до суттєвого рівня економічності палива на ХХ і малих навантажень, за рахунок зупинки поршнів, не менш ніж 30 % та збільшення міжремонтного ресурсу на 27 %.

Не дивлячись на велику кількість досліджень і наукових публікацій по проблемі відключення частини циліндрів у ДВЗ, на сьогоднішній день залишається ряд питань, які потребують більш глибокого вивчення.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, потужність, режим холостого ходу, навантаження, відключення частини циліндрів, відключення системи живлення, економія палива, робочий об'єм.

ВСТУП

На сьогоднішній день найгострішими у світі є дві проблеми, економія енергетичних ресурсів та зменшення навантаження на довкілля. Перевізники вантажів та пасажирів все більше звертають увагу на паливну економічність автомобілів, оснащених двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), що суттєво впливає на вартість перевезень і є одним із основних показників експлуатаційних характеристик автомобіля [1]. Головним завданням для машинобудівників є підвищення енергоефективності транспортних засобів, що в свою чергу дозволить зменшити витрати палива, знизити викиди відпрацьованих газів і зменшити вплив на довкілля.

Відомо, що ДВЗ всіх транспортних засобів в дійсності працюють в основному на режимах, що не потребують максимальної потужності, при цьому в місті ДВЗ в більшості часу працюють в режимі холостого ходу (ХХ) що від загального часу може становити до 25%. Режими ХХ і малі навантаження є неефективними, з позиції згоряння палива при традиційному дроселюванні, тому їм притаманні низький коефіцієнт корисної дії (ККД). В цьому випадку метод регулювання потужності двигуна шляхом відключення частини циліндрів (ВЧЦ) на режимах часткових навантажень і холостого ходу є одним з ефективних способів економії палива.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вперше ідея підвищення ефективності роботи бензинових ДВЗ за рахунок відключення частини циліндрів зародилася в 1905 р. в США [1], а потім в 1917 р. була далі продовжена [1, 2] та передбачала деактивацію 6-ти циліндрів у двигунах з 12-ю циліндрами.

Не відставала в цьому напрямку і Україна де в Національному транспортному університеті та Державтотранс НДІ проекті Мінтрансу проводились дослідження на автомобілі МАЗ-500 з V-подібним 6-циліндровим дизелем ЯМЗ-236 ще наприкінці 1970-х років та на дизельному ДВЗ Д-50. Харківська державна академія залізничного транспорту в свою чергу проводила дослідження на двотактному Д-100 і чотиритактних тепловозних дизелях типу 6ЧН 31,8/33 (ПДГ1М), 12ЧН 14/14, 6ЧН 26/26, 8ЧН 26/26, 16ЧН 26/26, і на тракторних дизелях 4Ч 12/14 (СМД-14) і 6ЧН 13/11,5 (СМД-62). А Київський національний університет будівництва й архітектури на дизелях будівельних машин [1, 3].

В своїх роботах [1-5 та багато ін.] дослідники вивчали не тільки найпростіші способи відключення циліндрів шляхом припиненням подачі палива, а так і складніші: коли поряд із

припиненням подачі палива одночасно здійснювалось примусове закриття або відкриття клапанів в циліндрах і таким чином відбувалось живлення відпрацьованими газами непрацюючих циліндрів від працюючих.

В 1966 р. проф. Андрусенко П.І. вперше запропонував регулювати потужність ДВЗ методом відключення окремих робочих циклів [1], цей метод детально дослідив в НТУ проф. Філіппов А.З. [1] відносно багатоциліндрових бензинових поршневих та роторно-поршневих двигунів. Що стосується дизельних ДВЗ, дослідження цього методу проводились в НУБіП України [3] та НУК імені адмірала Макарова [5]. Дослідження відносно дизелів, які проводились на протязі 15 років, підчас яких вивчено понад 5000 інформаційних джерел, показали, що в серійному виробництві метод відключення циліндрів був застосований тільки на тракторі Т-100М з двигунами Д-108, Т-130М, Д-160 і на автомобілі IFA W50LA з двигуном 4VD 14,5/12-1SRW [1].

В країнах далекого зарубіжжя також проводились подібні дослідження такими вченими, як Bemman Y.-J., Bowles P., Batteh J., Douglas K.J., Falkowski A., McElwee M., Bonne M., Fukui T., Howard G., Jost K., Kreuter P., Leone T.G., Pozar M., Moskwa J., Mangun D., Lemke A., Lahti J., Pischinger M., Sandford H., Allen J., Tudor R., Vinodh B., Univ A., Watanabe E., Fueutani I., Zheng Q., Zmudka Z., Postrzednik S., Ciesiolkiewicz A., Zammit J.P., McGhee M.J., Shayler P.J., Zammit J.-P., McGhee M.J., Shayler P.J., Pegg I., Mo H., Huang Y., Mao X., Zhuo B., Yang J., Quan L., Yang Y., Xin Q. (H.), Manna S. та інші [1].

На сьогодні ДВЗ у процесі доробки і тривалої експлуатації в своєму виконанні прийшли до свого завершення, класична схема з кривошипно-шатунним механізмом (КШМ) вже не в змозі забезпечити подальше удосконалення двигуна і покращення його експлуатаційних властивостей, тобто резерви покращення показників сучасних ДВЗ практично вичерпано.

ДВЗ основну частину часу працюють в режимі малих та середніх навантажень тому метод регулювання потужності відключенням циліндрів, в сучасному двигунобудуванні, набуває все більшого практичного застосування. Одним із перспективних в цьому плані вважається модульне відключення циліндрів [6].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі літературних джерел провести аналіз методів покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів, шляхом застосування в двигуні внутрішнього згоряння режиму відключення частини циліндрів, при забезпеченні надійності та функціональної стабільності колісних машин. Виявити які на сьогоднішній день є маловивченими проблеми в цьому питанні а також перспективи подальших досліджень і впроваджень у виробництво.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Майже і всіх проведених дослідницьких роботах доведено, що, при застосуванні методу ВЧЦ, паливна економічність може бути покращена, в залежності від способу та засобу реалізації методу, в межах від 3% до 25%, з одночасним покращенням і екологічних показників. В окремих випадках, в залежності умов експлуатації та категорії колісної машини, економія палива на режимах ХХ досягала навіть 40 % [1].

Основною причиною погіршення економічних характеристик бензинових ДВЗ в умовах роботи двигуна з частковим навантаженням є те що дросельна заслінка практично закрыта і двигун повинен всмоктувати необхідну кількість повітря для роботи ДВЗ (рис. 1).



Рисунок 1. Положення дросельної заслінки [7]

Це призводить до так званих втрат при прокачуванні і подальшого зниження ефективності роботи ДВЗ.

При роботі дизеля за малих подачах палива, малих циклових подач істотніше позначається витік палива через обмежену гідравлічну густину плунжерних пар, що разом із низкою інших

чинників призводить до зменшення тиску розпилювання і збільшення числа великих крапель у факелі.

Під час тривалої роботи дизелів на часткових навантаженнях спостерігається закоксовування розпилювачів форсунок і збільшення нагароутворення в камері згоряння.

Серед альтернативних способів підвищення ефективності роботи багатоциліндрових двигунів також є регулювання робочого об'єму двигуна. Шляхом зміни кількості працюючих циліндрів ми регулюємо навантаження на двигун. Багато провідних автомобілебудівних компаній на своїх двигунах вже застосовують систему відключення групи циліндрів (рис. 2) [8, 9].



Chrysler 5.7L HEMI V8

GM Vortec 5.3L V8

Рисунок 2. ДВЗ з відключенням груп циліндрів [8, 9]

Основна ідея цього способу зводиться до того, щоб за рахунок відключення частини циліндрів забезпечити роботу двигуна в широкому діапазоні часткових навантажень на економічному складі суміші. При цьому кожен із невмикнених у цей момент циліндрів може працювати в зоні мінімальних питомих витрат палива, що призводить до підвищення економічності двигуна в цілому. При такому вирішенні питання само собою вирішується і питання погіршення, на часткових режимах, показників ДВЗ із-за зменшеного кута відкриття дросельної заслінки [10]. Відпадає необхідність кількісного регулювання потужності в бензинових двигунах в зв'язку з необхідністю дроселювання суміші на впуску (рис 1).

Застосування вимкнення частини циліндрів на ХХ в дизельному ДВЗ дасть змогу збільшити навантаження циліндрів, які працюють, і вивести їх із несприятливої зони малих подач.

На сьогоднішній день існують дві групи відключення частини циліндрів, це [15]:

- зупинка кривошипно-шатунного механізму (КШМ);
- відключення системи живлення.

Найефективнішим способом деактивації циліндрів є зупинка КШМ. При застосуванні даного способу економія палива може сягати до 40%. Під час проведення випробувань автомобіля Alfa-Romeo 301.2, на який встановлено модульний двигун, по їздовому циклу Правил №15 ЄЕК ООН було досягнуто паливної економії на рівні 24,5%-38,2%. Результати випробувань залежали від маси встановленого вантажу [15].

Щоб створити модульний двигун конструктори стикаються з складними завданнями. Виконання цих завдань тягне за собою зниження надійності а також збільшення витрат на проведення їх технічного обслуговування, яке повинні проводити більш кваліфікований обслуговуючий персонал [15].

Для відключення системи живлення від циліндрів застосовують два способу:

- припиняють подачу свіжого заряду в циліндри;
- припиняють подачу палива в циліндри.

Для припинення подачі свіжого заряду в циліндри зупиняють клапанний механізм. Розрив кінематичного зв'язку між деталями газорозподільного, в системі відключення клапанів, виконує блокувальний механізм з електромагнітним або гідравлічним приводом [15].

Застосування цього способу є дуже складним в плані виконання самого механізму газорозподілу а також застосування системи управління. Також, при такому способі відключення системи живлення, в робочі камери циліндрів іноді потрапляє олива [10, 15].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Регулювання (зміна) робочого об'єму двигуна

Більшість автомобілів працюють в умовах коли змінюються навантаження на їх складові, а саме на ДВЗ. В більшості часу їм приходится працювати в режимах холостого ходу і малих навантажень. В таких режимах ДВЗ використовують лише частину своєї номінальної потужності від тої що була в них закладена. Для збільшення паливної економічності і моторесурсу ДВЗ пропонується використання на автомобільному

транспорті силові установки зі змінним об'ємом. При зміні навантаження на ДВЗ застосовують ступінчасту або плавну зміну робочого їх об'єму.

Плавне регулювання робочого об'єму.

У ДВЗ робочий об'єм циліндра визначають двома основними параметрами: діаметром циліндра і ходом поршня. Змінити діаметр циліндра під час роботи практично неможливо, тому варіанти регулювання об'єму пов'язані переважно зі зміною ходу поршня. Відомий дослідний двигун, у якому було реалізовано змінний хід поршня. Це був п'ятициліндровий мотор з діаметром циліндрів 85,7 мм, де хід поршня міг змінюватися від 26 мм до 108 мм [11]. За умови, коли хід зменшувався з 102 мм до 51 мм, знижуються механічні втрати на 40 %, це позитивно впливало на ефективність роботи (рис.3).

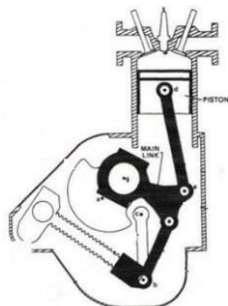


Рисунок 3. Схема двигуна Poliot [11]

Економія палива в цих дослідженнях була отримана на рівні 25% - 30 %.

Ступінчасте регулювання об'єму.

Відомо про кілька напрямків, при яких кількість працюючих циліндрів регулюються за ступінчастою зміною робочого об'єму.

Самим простим способом вважається припинення подачі у відключені циліндри палива [11].

Метод відключення в ДВЗ окремих робочих циклів є модифікацією відключення подачі палива. Повна зупинка газорозподілу, при утриманні в закритому стані його клапанів, вважається самим прогресивним способом відключення частини циліндрів.

Новітні системи подачі палива значно спрощують питання впровадження методу відключення окремих робочих циклів, тож цей метод потребує глибшого його вивчення.

Вся сутність даного методу полягає в тому, що під час зменшення (або збільшення) кількості навантажувальних робочих циклів, за рахунок припинення подачі палива в циліндри двигуна, відбувається і зміна навантаження. Цей метод застосовувався з метою зменшення закоксування розпилювачів форсунок на холостому ході, а також для зниження витрати палива на цьому режимі.

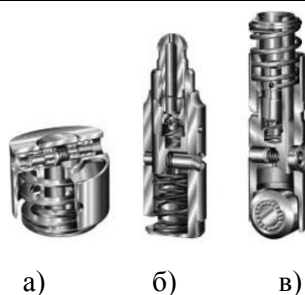
Стрімкий розвиток двигунобудування, з використанням прогресивних систем і механізмів, створює реальні можливості для впровадження методу відключення окремих робочих циклів, який у порівнянні з методом відключення циліндрів має ряд суттєвих переваг, в поєднанні з акумуляторною системою паливоподачі типу Common Rail та альтернативними газорозподільними механізмами, можна забезпечити найоптимальніші параметри робочого циклу дизеля, а регулювання його потужності при цьому здійснювати не зміною кількості впорскуваного в циліндр палива, а зміною частоти робочих циклів [1].

Щоб змінити об'єм двигуна розглянемо спосіб відключення системи живлення. Відключити циліндри від системи живлення, як було визначено раніше, можна двома способами: припиненням подачі свіжого заряду в циліндри або припиненням подачі палива в циліндри [15].

Утримання клапанів в закритому стані, для зупинки газообміну, здійснюється трьома шляхами за рахунок застосування [11]:

- штовхачів і гідроопор клапанів спеціальної конструкції;
- складених коромисел клапанів, наявність зв'язку між частинами яких визначається потребою у роботі даного циліндру;
- кулачків розподільчого валу, який має можливість переміщуватись в осьовому напрямку, різної форми.

Застосування даних систем, як відмічають автовиробники, покращує паливну економічність приблизно на 8-12 %. Системи подібних типів знайшли поширення у двигунах, що випускаються серійно (рис. 4) [11].



а – верхнє розташуваннє розподільчого валу і приводу клапанів штовхачем; б – верхнє розташуваннє розподільчого валу і приводу клапанів через важіль; в – нижньому розташуваннє розподільчого валу.

Рисунок 4. Механізми зупинки клапанів газорозподілу [11]

Система управління циліндрами дозволяє відключати деякі циліндри при невеликому навантаженні на двигун. При цьому дросельна заслінка відкривається для забезпечення необхідної потужності.

Двигуни концерну GMC Vortec 5.3L V8 і Vortec 6.0L V8 об'ємом 5,3 і 6,0 в своїй більшості оснащені системою відключення 4-х циліндрів DOD (Displacement On Demand) [12], яка має більш загальну назву – активна система керування витратою палива AFM (Active Fuel Managment), завдяки якій, при відключенні, паливо подається тільки в чотири циліндри з восьми з зупинкою впускних та випускних клапанів. Відключення клапанів відбувається за допомогою блоку соленоїдів, які діють на гідравлічні складові системи відключення клапанів та знаходяться між головками блоку циліндрів (рис. 5)

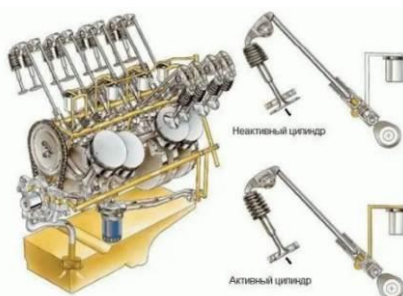


Рисунок 5. Система керування витратою палива AFM (Active Fuel Managment) [12]

Концерн Volkswagen розробив систему вимкнення циліндрів, яка отримала назву ZAS - Zylinderabschaltung [12]. Ця система дозволяє вимикати з роботи половину циліндрів двигуна. Її застосування планується на рядному 4-циліндровому та V-подібному 8-циліндровому двигунах з об'ємом 1,4 та 4 л відповідно (рис. 6).

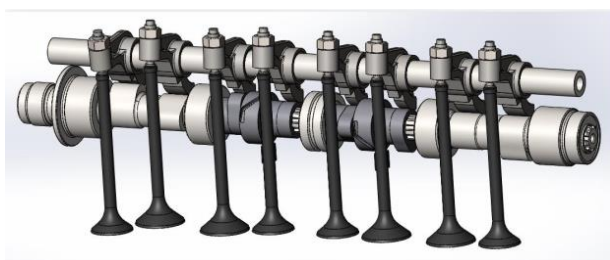
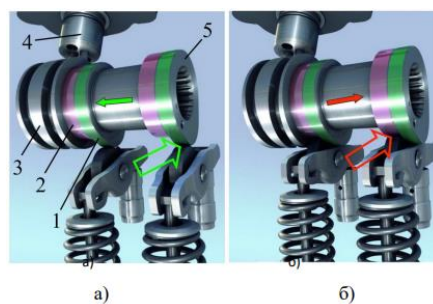


Рисунок 6. Загальний вид механізму відключення циліндрів [12]

Під час подавання сигналу від системи ZAS на електромагніт голівки керування 4 його якір входить в одну з гвинтових канавок 3, що розміщені на ділянках розподільного валу (рис. 7, а). Це змушує розподільний вал 5 пересунутися в напрямку стрілки (рисунок 7, б) і в такий спосіб задіяти контактну поверхню 2, по якій ковзатиме коромисло відповідного клапана.



1 - робоча поверхня розподільного вала; 2 - контактна поверхня розподільного вала; 3 - ділянка розподільного вала з нарізаними гвинтовими канавками; 4 - головка блока керування положенням розподільного вала; 5 - розподільний вал

Рисунок 7. Технологія деактивації циліндрів ZAS [12]

Для автомобілів Mercedes інженери концерну розробили атмосферний V подібний 8-циліндровий двигун з $V_h = 5,5$ л, в якому застосовано принципово нову систему деактивації циліндрів Mercedes Cylinder Management (MCM) [14]. Ця система дає змогу виключати з роботи частину циліндрів. Відключення/включення груп циліндрів відбувається приблизно за 30 мс.

На рис. 8 зображено загальний вигляд блокувальних опор системи Mercedes Cylinder Management.



а) при активованому циліндрі; б) циліндр деактивовано

Рисунок 8. Блокувальні опори системи Mercedes Cylinder Management [14]

Система Multi-Displacement System (MDS) була розроблена в 2004 р. для двигуна типу Hemi V8 об'ємом 5.7 л. Цей двигун має систему газорозподілу з нижнім розташуванням розподільного вала. Для вимкнення циліндра (шляхом утримання клапанів у закритому стані) застосовуються штовхачі спеціальної конструкції, принцип роботи яких подібний до блокувальних опор системи Mercedes Cylinder Management. Загальний вигляд двигуна із системою MDS представлено на рисунку 9. [13]



Рисунок 9. Система Multi-Displacement System [13]

Система може виключити з роботи 4 з 8 циліндрів. Час спрацьовування становить 40 мс. Паливо не надходить у відключені циліндри, а електронне керування дросельною заслінкою дає змогу здійснювати підтримку потужності двигуна в перехідний період. Використання системи MDS дало змогу зменшити витрату пального на 10 - 20%. Система активується за швидкості автомобіля вище 30 км/год і числа обертів двигуна нижче 3000 хв-1.

В своїй роботі [15] А. О. Молодан розробив математичну модель і методику, що визначають сили та моменти які діють в КШМ ДВЗ, при його роботі на режимах ХХ і часткових навантажень. Ця методика дозволяє оцінити вплив ВЧЦ на динамічні характеристики двигуна. Експериментальні дослідження на

автомобілі КраЗ – 2556 та стендові випробування двигуна КамАЗ-740.1 з використанням системи управління паливоподачею при ВЧЦ показали зниження витрати палива ДВЗ, що працює на режимах ХХ та часткових навантажень, до 30% та збільшення міжремонтного ресурсу до 27%. Для керування роботою двигуна А. О. Молодан розробив систему керування, що дозволяє задавати різні програми і може використовуватися при виборі найбільш оптимального варіанту ВЧЦ у двигунів різних розмірних груп [15].

Модульне відключення циліндрів.

По мірі підвищення навантаження, в ДВЗ з модульним ВЧЦ, в роботу вступають декілька роздільних (по кількості циліндрів) окремих частин (секцій, модулів). В цих частинах можливо зупиняти поршні при збереженні робочого процесу в інших. У відключених модулях в циліндро-поршневій групі відсутні втрати на тертя і газообмін, в зв'язку з тим що поршні нерухомі. В порівнянні з іншими методами ВЧЦ це надає йому суттєву перевагу [15].

Застосування з'єднувальних муфт.

В більшості варіантів по модульному відключенню циліндрів пропонується використовувати розрізний колінчастий вал, зв'язок між частинами якого забезпечується за допомогою спеціальних муфт. Циліндри в такому варіанті відключаються не по одинці, а групами.

Один з варіантів такої ідеї пропонує застосовувати зубчасту муфту [11]. Зубчаста муфта виконана за принципом синхронізатора коробки передач. Синхронізація частин колінчастого валу за робочим процесом відбувається завдяки асиметричному розташуванню зубців зубчастої муфти, за швидкістю – за рахунок конічної тертьової поверхні (рис. 10) [11].

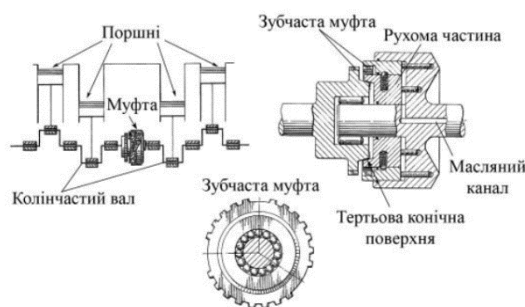


Рисунок 10. Ідея розрізного колінчастого валу [11]

Також для зв'язку між частинами колінчастого валу пропонується варіант з використанням електромагнітної муфти (рис. 11).



Рисунок 11. Електромагнітна муфта

Електромагнітні муфти набули досить широкого поширення. Це можна пов'язати з тим, що вони мають досить велику кількість переваг, які повинні враховуватися. Найбільш важливими вважаються:

- надійність;
- збереження своїх властивостей упродовж тривалого періоду;
- швидке спрацювання;
- компактність і мала вага.

Встановлення двох ДВЗ.

Одним з технічних рішень альтернативи методу вимкнення частини циліндрів, при зниженні зовнішнього навантаження на автомобіль, є використання силової установки із двома паралельно або послідовно встановленими ДВЗ (рис. 12) [16].

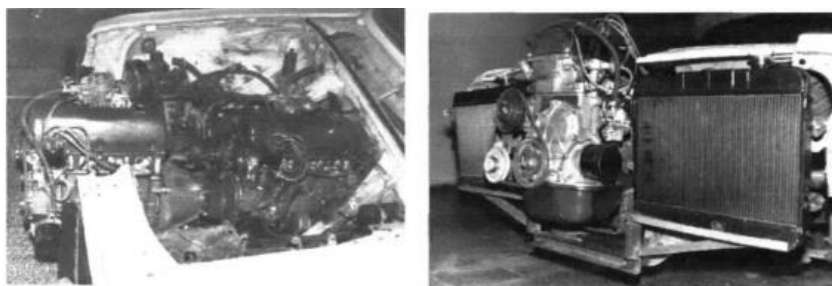


Рисунок 12. Автомобіль "Волга", обладнаний модульною СУ на базі двигунів ВАЗ-2101

Встановлення послідовно двох двигунів внутрішнього згоряння надає змогу, за рахунок зниження нерівномірності крутного моменту на вхідному валу трансмісії, зменшити витрату палива. За рахунок раціональної синхронізації робочих циклів встановлених двох ДВЗ маємо можливість підвищення енергоефективності автомобілів але для цього необхідно визначити раціональний кут взаємного розташування колінчастих валів обох ДВЗ [16].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Технологія відключення циліндрів стала універсальним інструментом економії палива у сучасному автомобілебудуванні. Якщо раніше вона застосовувалася лише у великих V8, то сьогодні її інтегрують навіть у чотирициліндрові двигуни [8, 9]. Це свідчить про прагнення виробників досягти балансу між потужністю та екологічністю. Відключення частини циліндрів двигуна внутрішнього згоряння може реалізовуватися двома принципово різними способами (табл. 1), які мають свої технічні особливості, переваги та недоліки [11].

Таблиця 1. Порівняльна характеристика способів ВЧЦ

Критерій	Зупинка КШМ	Відключення живлення
Складність конструкції	Висока	Низька/середня
Втрати на тертя	Мінімальні	Зберігаються
Втрати на газообмін	Відсутні	Частково залишаються
Надійність	Залежить від механічних муфт	Висока при сучасних ECU
Вібрації	Можливі через дисбаланс	Можливі через холості ходи
Практичність	Обмежене застосування	Широке застосування у сучасних ДВЗ

Обговорюючи ці два підходи, варто зазначити, що вони відображають різні етапи розвитку двигунобудування. Механічне відключення КШМ було характерним для ранніх експериментів, коли інженери прагнули максимально знизити втрати на тертя та газообмін [5-6]. Проте складність конструкції та ризики для надійності зробили цей метод малопоширеним у серійних автомобілях. Він залишився радше у сфері спеціалізованих або експериментальних рішень. Натомість електронне відключення системи живлення стало практичним компромісом між ефективністю та простотою. Сучасні системи керування двигуном (ECU) дозволяють швидко й точно регулювати подачу палива та повітря, що робить цей метод універсальним і придатним для масового використання. Саме завдяки цьому сьогодні ми бачимо технології ВЧЦ у багатьох легкових автомобілях (табл. 2), де вони допомагають знизити витрати пального та викиди CO₂ без значних змін у конструкції двигуна [14-15].

Таблиця 2. Порівняльна характеристика систем ВЧЦ різних виробників

Виробник	Система / Назва	Тип двигуна	Ефект
Chrysler/Dodge/Jeep	MDS (з 2004 р.)	V8	Економія палива на середніх швидкостях
GM (Cadillac, Chevrolet Tahoe)	AFM / V8 деактивація	V8	Відключення половини циліндрів
Volkswagen	TSI з відключенням	R4	Перше масове застосування у 4-циліндрових
Audi	COD	R4, V6, V8	Відключення половини циліндрів на малих навантаженнях

Виробник	Система / Назва	Тип двигуна	Ефект
Mazda	SkyActiv-G 2.5	R4	Сучасні кросовери, економія палива
BMW	323 (тестовий)	R6	Економія до 26%
Porsche	V8	V8	Економія до 35%

Важливо також враховувати експлуатаційні аспекти. Водії зазвичай не відчують моменту відключення циліндрів, якщо система реалізована через живлення, адже перехід відбувається плавно. У випадку механічної зупинки КШМ балансування двигуна може змінюватися, що призводить до відчутних вібрацій і зниження комфорту [1]. Тому практичність і комфорт стали вирішальними факторами на користь електронного керування.

Найбільший ефект досягається на малих і середніх навантаженнях, коли двигун не потребує повної потужності. У реальних умовах економія може становити від 10% до 30% (табл. 3), що є значним внеском у зниження витрат палива та викидів CO₂.

Таблиця 3. Характеристика експлуатаційних аспектів застосування систем ВЧЦ

Аспект	Зупинка КШМ	Відключення живлення
Комфорт водія	Може знижуватися через вібрації	Перехід майже непомітний
Вартість реалізації	Висока	Помірна
Масове застосування	Рідкісне	Широке
Економія палива	Теоретично максимальна	Практично значна (10–30%)
Екологічний ефект	Високий	Високий

Загалом, дискусія навколо цих методів показує, що технічна досконалість не завжди означає промислову доцільність. Механічне відключення може бути більш ефективним у теорії, але електронне відключення живлення виявилось оптимальним рішенням для масового виробництва, де важливі баланс між ефективністю, надійністю та економічністю.

ВИСНОВКИ

Спосіб відключення циліндрів пропонується застосовувати до сучасних ДВЗ, будь-то з іскровим запалюванням чи дизельних, з механічним приводом або електромеханічним приводом подачі палива. Одним із методів, яким можна реалізувати на двигунах відключення циліндрів, без значних конструктивних змін, є застосування методу модульного відключення циліндрів.

Таким чином, не дивлячись на тривалий період досліджень і велику кількість наукових публікацій по проблемі відключення циліндрів у ДВЗ, на сьогоднішній день залишається ряд питань, які потребують більш глибокого вивчення. Насамперед, це питання реалізувати синхронне припинення процесів газообміну, визначення максимальної кількості циліндрів одночасно відключаємих а також вивчення впливу методів ВЧЦ на зміну показників стабільної роботи і ресурсу ДВЗ, його вібрації, що, як відомо, є одним з недоліків цих методів та інші важливі для практики питання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бешун О.А. Історія розвитку, проблеми та перспективи застосування методу відключення циліндрів і циклів у ДВЗ. Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві : зб. матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (26-27 березня 2015 року, м. Ніжин) / За наук. ред. В. С. Лукача [та ін.]. — Ніжин, 2015.— С. 9-16.
2. Міщенко Н. І. Автомобільні двигуни з відключенням циліндрів. Конструкції, аналіз / Н. І. Міщенко [та інші] // Вісник СевНТУ Серія : Машиноприладобудування та транспорт. — Вип. 122. — Севастополь, 2011. — С. 163-166.
3. Бешун О. А. Вплив регулювання потужності дизеля відключенням окремих робочих циклів на його економічні, екологічні та динамічні показники : Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / О.А. Бешун. — К., 2006. — 282 с.
4. Peters G. Cylinder deactivation on 4-cylinder engines. A torsional vibration analysis : DCT 2007-11 [Електронний ресурс] / G. Peters; Eindhoven University of Technology. - February 15, 2007. — VII; 75 p. — Режим доступу: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/7849.pdf>.
5. Мошенцев Ю.Л. Моделирование рабочего цикла дизельного двигателя с системой периодического отключения работы цилиндров [Електронний ресурс] / Ю.Л. Мошенцев // Електронне

видання «Вісник НУК», 2012. – №3-4. – С. 77-83.

6. Теоретичні розрахунки відносно додаткової витрати палива при відключенні циліндрів / А.А. Молодан, А.С. Полянский // Інженерія природокористування. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – №2 (10). – С. 14-18.

7. ACT Cylinder Deactivation System. Self-Study Program 510. – Wolfsburg: Volkswagen AG, 2012. – 56 pp.

8. Chrysler 5.7L 345 HEMI Engine Specs, Problems, Reliability, Info. URL: https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=182.

9. 5.3L - LM4, LM7, L33, L59. URL: <https://bdtturnkeyengines.com/53l-lm4-lm7-l33-l59>

10. Коефіцієнт корисної дії і показники питоме споживання енергії при русі автомобіля / Д. В. Абрамов, Н.М. Подригало, М. А. Подригало // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»). – 2017. – Вип. 57. – С. 8–16.

11. Колеснікова Т.М., Заренбін В.Г. Аналіз двигунів з модульним відключенням циліндрів. Двигуни внутрішнього згоряння : всеукр. наук.-техн. журн.- Харків. 2016. С. 40-44.

12. Ричок С. О. Поліпшення показників двигуна з іскровим запалюванням удосконаленням комбінованого методу регулювання потужності: автореферат дис. на отримання наукового ступеня доктора філософії: спец. 142 Енергетичне машинобудування / – Київ, 2023. 210 с.

13. Marshall Brain. How HEMI Engines Work. URL: <https://auto.howstuffworks.com/naiaas2001.htm>.

14. Файст В. Л. Удосконалення вимог до динамічних властивостей легкових автомобілів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 “Експлуатація та ремонт засобів транспорту” / В.Л. Файст. – Харків, 2012. – 20 с.

15. Молодан А.О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів: автореферат дис. на отримання наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту. / А.О. Молодан. - Харків, 2021. 40 с.

16. Подригало М.А., Вахнюк С.А. Послідовне встановлення двох двигунів внутрішнього згоряння на автомобілі як метод зниження нерівномірності крутного моменту. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. – № 1(19). 2024. С. 103-108.

REFERENCES

1. Beshun, O.A. History of Development, Challenges, and Prospects for the Application of Cylinder and Cycle Deactivation Methods in Internal Combustion Engines. Current Trends and Prospects for the Development of Balanced Environmental Management in Agro-Industrial Production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 26–27, 2015, Nizhyn) / Edited by V. S. Lukach [et al.]. – Nizhyn, 2015. – pp. 9–16.

2. Mishchenko, N. I. Automotive engines with cylinder deactivation. Designs, analysis / N. I. Mishchenko [et al.] // Bulletin of SevNTU Series: Machine and Instrument Engineering and Transport. – No. 122. – Sevastopol, 2011. – pp. 163–166.

3. Beshun O. A. The effect of regulating diesel engine power by deactivating individual power strokes on its economic, environmental, and dynamic performance: Diss. ... Cand. Tech. Sci.: 05.05.03 / O. A. Beshun. – Kyiv, 2006. – 282 p.

4. Peters G. Cylinder deactivation on 4-cylinder engines. A torsional vibration analysis : DCT 2007-11 [Electronic resource] / G. Peters; Eindhoven University of Technology. - February 15, 2007. – VII; 75 p. – Access mode: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/7849.pdf> .

5. Moshentsev, Yu. L. Modeling the operating cycle of a diesel engine with a cylinder deactivation system [Electronic resource] / Yu. L. Moshentsev // Electronic publication “Bulletin of NUK,” 2012. – No. 3–4. – Pp. 77–83.

6. Theoretical calculations regarding additional fuel consumption during cylinder deactivation / A.A. Molodan, A.S. Polyansky // Environmental Engineering. – Kharkiv: Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 2018. – No. 2 (10). – pp. 14–18.

7. ACT Cylinder Deactivation System. Self-Study Program 510. – Wolfsburg: Volkswagen AG, 2012. – 56 pp.

8. Chrysler 5.7L 345 HEMI Engine Specs, Problems, Reliability, Info. URL: https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=182.

9. 5.3L - LM4, LM7, L33, L59. URL: <https://bdtturnkeyengines.com/53l-lm4-lm7-l33-l59>

10. Efficiency and Specific Energy Consumption During Vehicle Operation / D. V. Abramov, N. M. Podrygalo, M. A. Podrygalo // Scientific Notes. Interuniversity Collection (in the field of “Technical Sciences”). – 2017. – Issue 57. – Pp. 8–16.

11. Kolesnikova T.M., Zarenbin V.G. Analysis of engines with modular cylinder deactivation. Internal

Combustion Engines: All-Ukrainian Scientific and Technical Journal. – Kharkiv, 2016. pp. 40–44.

12. Rychok S.O. Improvement of Spark-Ignition Engine Performance by Refining the Combined Power Control Method: Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: Specialty 142 Power Engineering / – Kyiv, 2023. 210 pp.

13. Marshall Brain. How HEMI Engines Work. URL: <https://auto.howstuffworks.com/naias2001.htm>.

14. Faist V. L. Improvement of Requirements for the Dynamic Properties of Passenger Cars: Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: Specialty 05.22.20 “Operation and Repair of Transport Vehicles” / V. L. Faist. – Kharkiv, 2012. – 20 p.

15. Molodan A.O. Scientific foundations for ensuring the reliability and functional stability of wheeled vehicles in cylinder deactivation mode: abstract of dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.20 Operation and repair of transport vehicles. / A.O. Molodan. - Kharkiv, 2021. 40 p.

16. Podrygalo M.A., Vakhnyuk S.A. Sequential installation of two internal combustion engines on a vehicle as a method for reducing torque unevenness. Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. Vinnytsia: VNTU, 2024. – No. 1(19). 2024. pp. 103–108.

S. Vakhniuk. Analysis of existing studies on the deactivation of some cylinders in internal combustion engines when vehicle loads decrease

Based on the literature, this article analyzes methods for improving the economic and environmental performance of vehicles by implementing cylinder deactivation in internal combustion engines, while ensuring the reliability and operational stability of wheeled vehicles. The article identifies challenges in this area as well as prospects for further research.

Internal combustion engines used in automotive transport operate under constantly changing load conditions. Most of the time is spent in low-load and idle modes. In these modes, the engine's rated power is utilized only partially.

One alternative method for improving the efficiency of multi-cylinder engines during idle and partial-load operation is to regulate the load by changing the engine's displacement through the deactivation of some of the operating cylinders.

This paper examines various methods for implementing engine cylinder deactivation, which are divided into two main groups: stopping the crankshaft-connecting rod mechanism (CCM) (modular internal combustion engine) and deactivating the fuel supply system.

The study results showed that deactivating some of the cylinders through smooth or stepwise displacement control or modular cylinder deactivation, according to estimates by researchers in this field, leads to a significant improvement in fuel economy at idle and low loads, due to the stopping of pistons, by at least 30%, and an increase in the service life between overhauls by 27%.

Despite the large number of studies and scientific publications on the issue of cylinder deactivation in internal combustion engines, a number of questions remain that require further investigation.

Key words: internal combustion engine, power, idle mode, load, cylinder deactivation, fuel cut-off, fuel economy, displacement.

ВАХНЮК Сергій Анатолійович, аспірант, кафедра технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3584-7730>; e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com.

Serhii VAKHNIUK, graduate student, Department of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3584-7730>; e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com.

Дата надходження статті до видання: 28.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

<https://doi.org/10.36910/1r7yfk95>

Гандзюк М.О., Дембіцький В.М.
Луцький національний технічний університет

СТАБІЛІЗАЦІЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕАКЦІЙ ДОРОГИ НА КОЛЕСА АВТОМОБІЛЯ

Розглянуто питання підвищення стійкості руху та плавності ходу автомобіля під час руху по періодичних нерівностях. Коливання автомобіля впливають практично на всі його основні експлуатаційні властивості (стійкість, керованість і плавність ходу), а також на витрату палива. Рух автомобіля в умовах резонансного режиму коліс може супроводжуватися ослабленням вертикальної реакції дороги на них і навіть їх відривом від дороги, що призводить до зниження стійкості автомобіля.

Резонансні коливання кузова характеризуються значними лінійними та кутовими переміщеннями самого кузова й корисного навантаження автомобіля (водій, пасажери, вантажі тощо). Такі переміщення можуть спричинити небезпечні дорожньо-транспортні ситуації. Таким чином, проявляються несприятливі умови руху з точки зору стійкості та керованості транспортного засобу, а також плавності ходу, що визначає рівень комфорту.

Запропоновано нову систему активної безпеки автомобіля, яка дозволяє підвищити плавність ходу. Наведено результати дослідження впливу роботи системи стабілізації вертикальних реакцій дороги на плавність ходу автомобіля.

Ключові слова: автоматизоване керування підвіски автомобіля, автоматизоване керування, стабілізація вертикальних реакцій дороги, система стабілізації вертикальних реакцій, стійкість руху автомобіля, плавність ходу автомобіля.

ВСТУП

У світі чимало країн, що займають величезні території (США, Китай, Росія, Індія, Канада тощо), де досить складно забезпечити належну якість доріг, протяжність яких вимірюється десятками й сотнями тисяч кілометрів. Геологічні та кліматичні умови, сезонні явища й характер руху транспортних засобів спричиняють деформації та порушення рівності доріг – як ґрунтових, так і з твердим покриттям.

У багатьох випадках характер деформацій призводить до утворення на дорозі певного періодичного профілю, близького до синусоїди, з довжинами хвиль від 0,5 до 1,5 м. Якщо довжина хвилі періодичного профілю становить 1 м, то при швидкості автомобіля 36 км/год система підресорювання отримує кінематичне збудження з частотою 10 Гц. Це значення частоти перебуває в діапазоні реальних власних частот коліс у системі підресорювання машин (5...12 Гц). При збігу згаданих частот колеса рухомого транспортного засобу починають зазнавати інтенсивних коливань, що супроводжуються значними змінами вертикальної сили, яка діє на колесо з боку дороги. У певних випадках вертикальна реакція дороги на колесо може виявитися нульовою.

Зменшення вертикальної реакції знижує стійкість автомобіля, що може призвести до небезпечних дорожньо-транспортних ситуацій у разі дії бокових сил, створюваних вітром або відцентровою силою під час руху на віражі. Якщо автомобіль зазнає впливу періодичного профілю дороги на частоті власних коливань підресореної маси у русі вздовж вертикальної осі чи в поздовжніх кутових коливаннях, то виникає можливість зменшення вертикальної реакції, що також веде до зниження стійкості автомобіля.

Звідси впливає доцільність створення систем активної безпеки, які знижують такі коливання до безпечних меж і тим самим підвищують безпеку руху транспортних засобів на ділянках із вираженим періодичним профілем. Одним із відомих технічних рішень такого типу є система стабілізації положення підресореної маси, застосована на серійному автомобілі Mercedes W220 S550.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Коливання в системах підресорювання залишаються предметом дослідження вітчизняних та зарубіжних учених уже протягом багатьох років. У публікаціях [3, 5, 6, 7, 8] розглянуто динаміку руху автомобільного колеса та сили, що діють на автомобільне колесо при русі по нерівній дорозі. У працях [1, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14] представлено численні варіанти систем автоматизованого керування підвіскою автомобіля, включаючи активні та напівактивні системи підресорювання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – дослідження методу підвищення стійкості руху автомобіля по періодичних нерівностях шляхом стабілізації вертикальних реакцій дороги та його впливу на стабілізацію

положення кузова за висотою й кутами у поздовжній і поперечній вертикальних площинах, тобто на підвищення активної безпеки та плавності ходу автомобіля.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунку 1 наведено схему системи керування стабілізацією вертикальних реакцій дороги на одне колесо автомобіля, яка включає в себе підресорену масу m_2 та непідресорену масу m_1 , а також підвіску, що їх з'єднує. Перша імітує масу кузова автомобіля, друга – масу автомобільного колеса з рухомими деталями підвіски, підшипникового вузла та гальмівного механізму.

До складу підвіски, що з'єднує маси m_2 та m_1 , входить пружний елемент із жорсткістю c_y , амортизатор із коефіцієнтом опору k_a та розташований паралельно до них керований елемент – виконавчий пристрій, який часто називають актуатором. Як такий пристрій можна використовувати практично будь-який двигун лінійної дії: гідравлічний циліндр, електромагнітний лінійний двигун або пневмодвигун. Ці агрегати можуть відрізнятися як за характеристиками, так і за особливостями керування ними.

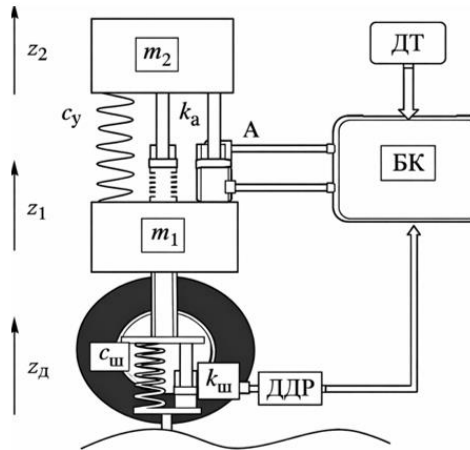


Рисунок 1 – Схема системи керування стабілізацією вертикальних реакцій дороги на колесо автомобіля під час руху по періодичному профілю

А – актуатор (гідроциліндр);
ДТ – джерело тиску;
БК – блок керування;
ДДР – датчик динамічного радіуса

Подана на рисунку 1 модель описується рівняннями

$$m_2 \ddot{z}_2 = c_y (z_1 - z_2 + A_p) + k_a (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_c (z_1 - z_d - r_d) - m_2 g,$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = -c_y (z_1 - z_2 + A_p) - k_a (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_c (z_1 - z_d - r_d) - m_1 g + c_{ш} (z_d - z_1 + A_{ш}) + k_{ш} (\dot{z}_d - \dot{z}_1).$$

де $\ddot{z}_2$, $\ddot{z}_1$ – вертикальні прискорення;

$\dot{z}_2$, $\dot{z}_1$ – вертикальні швидкості;

z_2 , z_1 – координати підресореної та непідресореної мас відповідно;

A_p , $A_{ш}$ – сталі коефіцієнти;

c_c – передавальний коефіцієнт, що визначає силу, створювану в актуаторі;

z_d – вертикальна координата профілю дороги;

r_d – динамічний радіус колеса автомобіля у стані спокою;

$c_{ш}$ – радіальна жорсткість шини;

$k_{ш}$ – коефіцієнт демпфування в шині.

Для розв'язання задачі про коливання системи підресорювання автомобіля створимо його часткову динамічну модель, а саме модель системи підресорювання з елементами системи керування стабілізацією вертикальних реакцій. Схему цієї системи наведено на рисунку 2, де α_x – кут крену; α_y – кут тангажу (кут у поздовжній вертикальній площині між горизонтальною та поздовжньою осями автомобіля); С – центр ваги автомобіля.

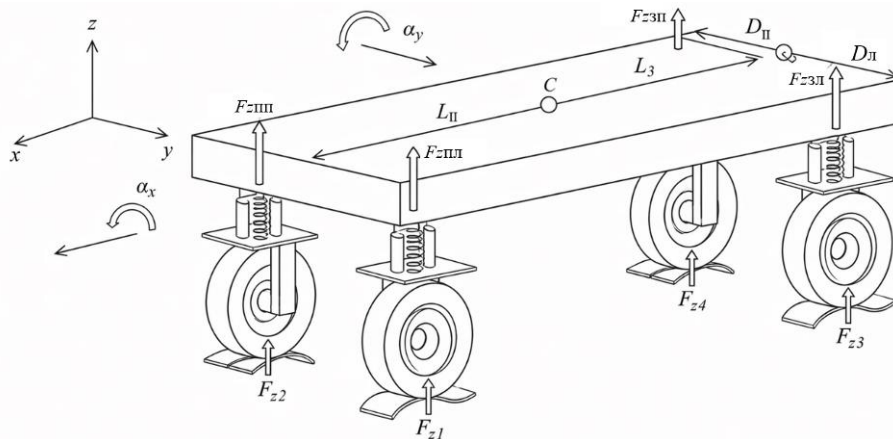


Рисунок 2 – Схема динамічної моделі системи підресорювання автомобіля з активним керуванням вертикальними реакціями дороги на колеса

Подана на рисунку 2 модель описується рівняннями

$$\begin{aligned} J_y \ddot{\alpha}_y &= (F_{z3l} + F_{z3n})L_3 - (F_{znl} + F_{z3n})L_n; \\ J_x \ddot{\alpha}_x &= (F_{znl} + F_{z3l})D_l - (F_{znn} + F_{z3n})D_n; \\ m_p \ddot{z} &= F_{znn} + F_{znl} + F_{z3l} + F_{z3n}, \end{aligned}$$

де J_y і J_x – моменти інерції кузова автомобіля відносно осей y та x ;

$F_{znl}, F_{z3l}, F_{znn}, F_{z3n}$ – сумарні сили, що діють на кузов від підвісок;

L_3 і L_n – відстані від поперечної вертикальної площини, що проходить через центр тяжіння автомобіля, до задньої та передньої підвісок;

D_l і D_n – відстані від поздовжньої вертикальної площини, що проходить через центр тяжіння, до лівої та правої підвісок;

m_p – підресорена маса автомобіля;

$\ddot{z}$ – прискорення центру ваги відносно осі z .

При реальному русі автомобіля в режимі резонансу коліс може виникнути їх відрив від дороги. У цьому випадку математичний опис зв'язку колеса з дорогою набуває нелінійного характеру. До прийнятого для лінійної моделі опису додається умова, що вертикальна реакція колеса не може бути від'ємною. Для розв'язання такої нелінійної задачі застосовують метод імітаційного моделювання, який може бути реалізований у пакеті MATLAB/Simulink.

Моделювання руху автомобіля в режимі резонансу колеса (при частоті 11 Гц) по синусоїдальному профілю з амплітудою 0,035 м дозволяє оцінити ефективність керування процесом стабілізації вертикальних реакцій на такій високій частоті. Діаграму зміни у часі t вертикальної реакції дороги (F_z) на колеса автомобіля під час руху в режимі їх резонансу по синусоїдальному профілю з амплітудою 0,035 м – без керування та з керуванням вертикальними реакціями наведено на рисунку 3.

На цьому та наступних рисунках показано режими руху автомобіля без керування вертикальними реакціями у інтервалі 0...10 с та з керуванням вертикальними реакціями у діапазоні 10...20 с.

При русі автомобіля без керування вертикальною реакцією розмах вертикальної реакції колеса становить для автомобіля Mercedes W220 S550 14500 Н, а з керуванням вертикальною реакцією – 7855 Н, тобто її значення зменшується майже вдвічі. Це суттєво підвищує стійкість автомобіля, а отже і безпеку його руху.

Однак при цьому спостерігається невелике збільшення амплітуди вертикальних коливань центра ваги кузова: при частоті 11 Гц у режимі некеруваної підвіски вона становить 0,6 мм, а при застосуванні системи стабілізації вертикальних реакцій – 1,6 мм. Таке зниження плавності ходу автомобіля є цілком допустимим, враховуючи значне підвищення його стійкості.

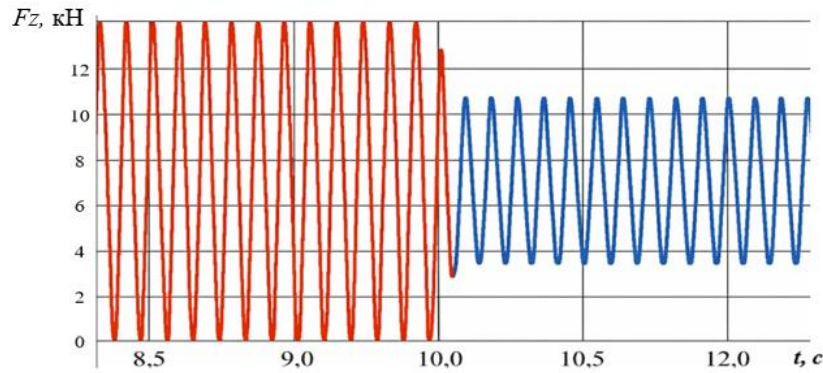


Рисунок 3 – Діаграма зміни у часі t вертикальної реакції дороги F_z на колеса автомобіля під час руху в режимі їх резонансу

На рисунку 4 наведено діаграми зміни у часі миттєвої потужності P , витраченої на керування системою стабілізації вертикальної реакції дороги на колеса, та сили $F_{ц}$, створюваної актуатором. Максимальна миттєва потужність P становить 10 кВт, а середня – 8,3 кВт. Керувальна сила $F_{ц}$ змінюється в межах $-4 \dots +4$ кН.

Найважливішою перевагою нового методу керування вертикальними реакціями є здатність системи забезпечувати стабілізацію як вертикальної реакції дороги на колеса автомобіля, так і (у певній мірі) положення його кузова на частоті власних коливань по вертикальній осі, а також при поздовжніх і поперечних кутових коливаннях.

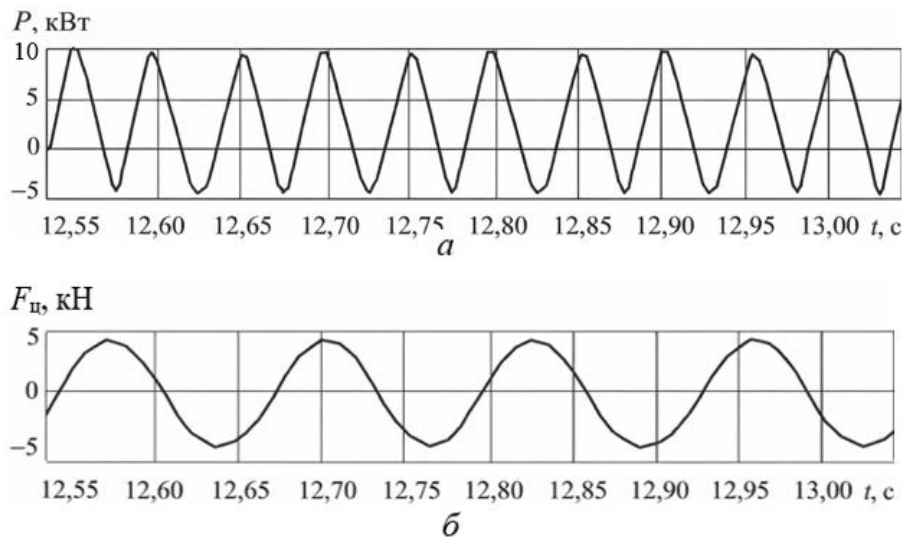


Рисунок 4 – Діаграми зміни у часі t параметрів роботи системи стабілізації вертикальної реакції дороги на колеса

a – миттєвої потужності P , витраченої на керування системою стабілізації вертикальної реакції дороги на колеса;
 b – сили $F_{ц}$, створюваної актуатором

При моделюванні коливань автомобіля, підвіска якого збуджується на частоті власних коливань кузова від дії дороги синусоїдального профілю з амплітудою 0,05 м, режим руху без керування вертикальною реакцією представлений у інтервалі $0 \dots 10$ с, а з керуванням вертикальною реакцією – у діапазоні $10 \dots 20$ с.

З огляду на те, що при русі автомобіля по періодичних нерівностях у режимі вертикальних коливань кузова всі колеса рухаються та навантажуються однаково (оскільки модель виконана симетрично відносно власних горизонтальних осей), на діаграмі (рисунк 5а) наведено криву зміни у часі вертикальної сили на одному колесі. Амплітуда коливань вертикальної реакції дороги на колеса за відсутності керування вертикальною реакцією становить 5187 Н, а за його наявності – близько 1341 Н, тобто її значення зменшується майже у 4 рази.

Результати розрахунку вертикального положення центра ваги автомобіля при коливаннях на власній частоті кузова в процесі руху по синусоїдальному профілю з амплітудою 0,05 м

(рисунк 5б) показали, що без керування вертикальною реакцією амплітуда вертикальних коливань центра ваги дорівнює 0,26 м, а з керуванням вертикальною реакцією – 0,069 м, тобто друге значення становить 26 % від першого.

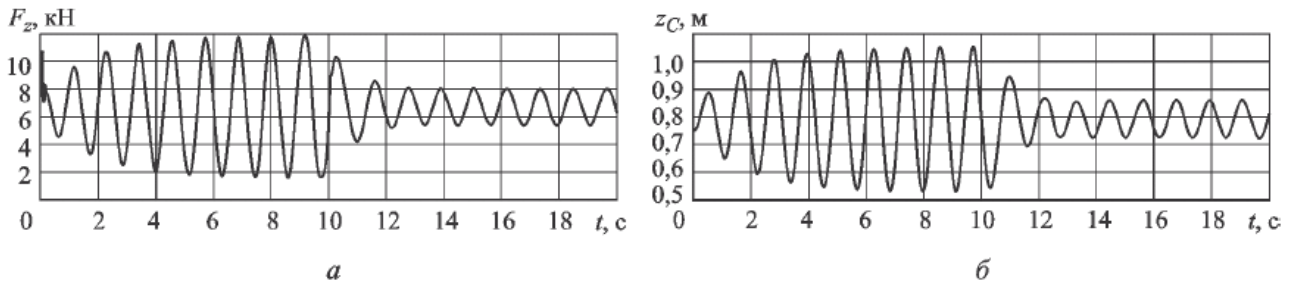


Рисунок 5 – Діаграми зміни у часі t під час руху по синусоїдальному профілю з амплітудою 0,05 м без керування (0...10 с) та з керуванням (10...20 с)

вертикальною реакцією дороги на колесо автомобіля

- а – вертикальної реакції дороги F_z на колеса автомобіля в резонансному режимі коливань кузова ;
б – вертикального положення центра ваги автомобіля z_c при коливаннях на власній частоті кузова

При дослідженні впливу роботи системи стабілізації вертикальної реакції дороги на поздовжні кутові коливання кузова автомобіля в розрахунковій моделі прийнято допущення, що автомобіль має симетрично розподілене навантаження на передню і задню осі, а також на ліву і праву сторони, що дає змогу вважати незалежними вертикальні та поздовжні кутові коливання кузова.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Найважливішою перевагою нового методу керування вертикальними реакціями є здатність системи забезпечувати стабілізацію як вертикальної реакції дороги на колеса автомобіля, так і положення його кузова на частоті власних коливань по вертикальній осі, а також при поздовжніх і поперечних кутових коливаннях.

Результати моделювання режиму руху автомобіля по профілю дороги, який збуджує поздовжні та поперечні кутові коливання кузова з резонансною частотою, показали ефективність керування вертикальними реакціями коліс з точки зору стабілізації положення кузова як за поздовжнім кутом (кутом тангажу), так і за поперечним (кутом крену).

Значення амплітуди коливань кута тангажу α_y без керування вертикальною реакцією дороги на колесо становить $8,5^\circ$, а з керуванням – $2,5^\circ$.

Величина амплітуди коливань кута крену α_x без керування вертикальною реакцією дороги на колесостановить $12,5^\circ$, а з керуванням – 5° .

Застосування системи стабілізації вертикальної реакції на колеса дозволило зменшити значення амплітуд α_y та α_x до 2,5 і 5° , тобто більш ніж у 3 та 2,5 рази відповідно.

ВИСНОВОК

Використання запропонованої активної підвіски, що включає систему керування вертикальною реакцією дороги на колеса автомобіля, забезпечує стабілізацію вертикальної реакції дороги на колеса та підвищує стійкість руху автомобіля, зменшуючи амплітуду вертикальної сили взаємодії дороги і колеса на 55...65 % та стабілізацію вертикальної координати положення кузова у просторі, а також кутів тангажу α_y і крену α_x , що підвищує плавність ходу автомобіля та комфорт пасажирів, знижуючи амплітуду вертикальних і кутових коливань у 2–3 рази.

Потужність, витрачена на керування підвісками чотирьох коліс легкового автомобіля, у середньому становить від 0,25 до 16 кВт.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко А. І. Математичний опис руху не підресорених і підресорених мас вантажного автомобіля в процесі гальмування / А. І. Бондаренко, В. Ю. Ткачов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Технічні науки» – 2017. – № 14 (1236). – С. 3–9. URL:

https://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_14.pdf

2. Гандзюк М. О. Визначення нормальних реакцій опорної поверхні при русі модульного триланкового причіпного автопоїзда ускладі «автомобіль–тягач – двовісний підкатний візок –

тривісний напівпричіп» у гальмівному режимі / М. О. Гандзюк, Д. М. Гандзюк // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті – 2019. – №2(13). – С. 38–51.

<https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.86>

3. Гащук П. М. Загальний опис динаміки колеса пожежної машини у феноменологічних термінах / П. М. Гащук // Збірник наукових праць ЛДУ БЖД «Пожежна безпека» – 2013. – №23. – С. 50–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/download/494/487/>

4. Манзяк М. О. Тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів / М.О. Манзяк, Л.В. Крайник, М.Г. Грубель // Системи озброєння і військова техніка – 2021. № 1(65). – С. 27–35. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/download/540/454/>

5. Опанасюк Є. Г. До визначення сил, що діють на автомобільне колесо при буксуванні / Є. Г. Опанасюк, Д. Б. Бегерський // Вісник ЖДТУ – 2016. – № 1 (76). – С. 128–136. URL:

<http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/4650>

6. Поляков В. М. Визначення рівнодіючої сил взаємодії автомобільного колеса з нерівною поверхнею дороги / В. М. Поляков, О. О. Разбойніков // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки» – 2017. – Вип. 1(37). – С. 329–338. URL:

<http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/329.pdf>

7. Поляков В. М. Визначення параметрів роботи підвіски автомобіля при його русі по нерівній опорній поверхні / В. М. Поляков, О. О. Разбойніков // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». – 2017. – Вип. 3(39). – С. 117–126. URL:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2017_3_17

8. Разбойніков О. О. Вплив швидкості автомобіля на зміну сил, що діють в ходовій частині при русі по нерівній дорозі / О. О. Разбойніков. Rzeszow : Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukaszewicza, Monografia pod redakcją naukową Kazimierza Lejdy, Systemy i Środki Transportu Samochodowego. Seria : Transport. – 2017. – №10. – Р. 87–94.

9. Fayyad S.M. Constructing Control System for Active Suspension System. Contemporary Engineering Sciences, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 189–200. URL:

<http://m-hikari.com/ces/ces2012/ces1-4-2012/fayyadCES1-4-2012-1.pdf>

10. Fang J. Active suspension system of quarter car. A thesis presented to the graduate school of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science, University of Florida, 2014. 70 p. URL: <http://matlabproject.ir/form/files/246735.pdf>

11. Kruczek A., Stribrsky A., Honcu J., Hlinovsky M. Automotive active suspension – case study on H-infinity control. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation, 2011, pp. 392–397. URL:

<http://wseas.us/e-library/conferences/2011/Lanzarote/ACMOS/ACMOS-78.pdf>

12. Kruczek A., Stribrsky A., Honcu J., Hlinovsky M. Active Suspension – Case Study on Robust Control. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, vol. 78, pp. 411–416. URL: <http://waset.org/publications/15781/active-suspension-case-study-onrobust-control>

13. Schofield B. Model-Based Vehicle Dynamics Control for Active Safety. PHD thesis, Lund Institute of Technology, 2008. 186 p.

14. Venkateswarulu E., Ramesh raju N., Seshadri G. The active suspension system with hydraulic actuator for half car model analysis and self-tuning with PID controllers. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2014, vol. 3, is. 9, pp. 415–421. URL:

<http://esatjournals.net/ijret/2014v03/i09/IJRET20140309065.pdf>

REFERENCES

1. Bondarenko, A. I., & Tkachov, V. Yu. (2017). Mathematical description of the motion of unsprung and sprung masses of a truck during braking. *Bulletin of NTU "KhPI". Technical Sciences Series*, (14/1236), 3–9. Retrieved from https://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_14.pdf

2. Handziuk, M. O., & Handziuk, D. M. (2019). Determination of normal reactions of the supporting surface during the motion of a modular three-link articulated road train consisting of “truck tractor – two-axle dolly – three-axle semi-trailer” in braking mode. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 2(13), 38–51.

3. Hashchuk, P. M. (2013). General description of the dynamics of a fire truck wheel in phenomenological terms. *Collection of Scientific Papers of Lviv State University of Life Safety "Fire Safety"*, (23), 50–56. Retrieved from <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/download/494/487/>

4. Manziak, M. O., Kraynyk, L. V., & Hrubel, M. H. (2021). Trends in the development of military vehicle suspension designs. *Weapons Systems and Military Equipment*, 1(65), 27–35. Retrieved from <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/download/540/454/>
5. Opanasiuk, Ye. H., & Beherskyi, D. B. (2016). On determining the forces acting on a vehicle wheel during slipping. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University*, 1(76), 128–136. Retrieved from <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/4650>
6. Polyakov, V. M., & Razboinikov, O. O. (2017). Determination of the resultant force of interaction between a vehicle wheel and an uneven road surface. *Bulletin of the National Transport University. Technical Sciences Series*, 1(37), 329–338. Retrieved from <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/329.pdf>
7. Polyakov, V. M., & Razboinikov, O. O. (2017). Determination of suspension parameters of a vehicle moving on an uneven supporting surface. *Bulletin of the National Transport University. Technical Sciences Series*, 3(39), 117–126. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2017_3_17
8. Razboinikov, O. O. (2017). Influence of vehicle speed on changes in forces acting in the running gear when driving on an uneven road. In K. Lejda (Ed.), *Systems and Means of Road Transport. Series: Transport* (No. 10, pp. 87–94). Rzeszów: Rzeszów University of Technology.
9. Fayyad, S. M. (2012). Constructing control system for active suspension system. *Contemporary Engineering Sciences*, 5(4), 189–200. Retrieved from <http://m-hikari.com/ces/ces2012/ces1-4-2012/fayyadCES1-4-2012-1.pdf>
10. Fang, J. (2014). *Active suspension system of quarter car* (Master's thesis). University of Florida. 70 p. Retrieved from <http://matlabproject.ir/form/files/246735.pdf>
11. Kruczek, A., Stribrsky, A., Honcu, J., & Hlinovsky, M. (2011). Automotive active suspension – case study on H-infinity control. In *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation* (pp. 392–397). Retrieved from <http://wseas.us/e-library/conferences/2011/Lanzarote/ACMOS/ACMOS-78.pdf>
12. Kruczek, A., Stribrsky, A., Honcu, J., & Hlinovsky, M. (2011). Active suspension – case study on robust control. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 78, 411–416. Retrieved from <http://waset.org/publications/15781/active-suspension-case-study-onrobust-control>
13. Schofield, B. (2008). *Model-based vehicle dynamics control for active safety* (Doctoral dissertation). Lund Institute of Technology. 186 p.
14. Venkateswarulu, E., Ramesh Raju, N., & Seshadri, G. (2014). The active suspension system with hydraulic actuator for half car model analysis and self-tuning with PID controllers. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(9), 415–421. Retrieved from <http://esatjournals.net/ijret/2014v03/i09/IJRET20140309065.pdf>

M. Handziuk, V. Dembitskyi. Stabilization of vertical road reactions on automobile wheels

The issue of improving vehicle stability and ride smoothness when driving over periodic road irregularities is considered. Vehicle oscillations affect almost all of its main performance characteristics (stability, controllability, and ride comfort), as well as fuel consumption. Vehicle motion under wheel resonance conditions may be accompanied by a reduction in the vertical road reaction on the wheels and even their detachment from the road, which leads to decreased vehicle stability. Resonant oscillations of the body are characterized by significant linear and angular displacements of the body itself and the useful load of the vehicle (driver, passengers, cargo, etc.). Such displacements may cause dangerous traffic situations. Thus, unfavorable driving conditions arise in terms of vehicle stability and controllability, as well as ride smoothness, which determines the level of comfort. A new active safety system for the vehicle is proposed, which makes it possible to improve ride smoothness. The results of a study on the influence of the vertical road reaction stabilization system on vehicle ride smoothness are presented.

Key words: automated vehicle suspension control, automated control, stabilization of vertical road reactions, vertical reaction stabilization system, vehicle stability, ride smoothness.

ГАНДЗЮК Микола Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: Gandzyuk64.MG@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3552-4256>

ДЕМБІЦЬКИЙ Валерій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: dvm2@meta.ua. <http://orcid.org/0000-0002-1006-9218>

Mykola HANDZIUK, Ph.D in Engineering, associate professor of automobiles and transport technologies department, Lutsk National Technical University, e-mail: Gandzyuk64.MG@gmail.com.
<http://orcid.org/0000-0002-3552-4256>

Valerii DEMBITSKYI, Ph.D in Engineering, associate professor of automobiles and transport technologies department, Lutsk National Technical University, e-mail: dvm2@meta.ua.
<https://orcid.org/0000-0002-1006-9218>

Дата надходження статті до видання: 01.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

<https://doi.org/10.36910/5tj3br85>

Гнип М.М.

*Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ
ДВИГУНА Д21А1 У ПРОЦЕСІ ВИКОРИСТАННЯ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ
SME**

На даний час у сфері альтернативних видів палива спостерігається постійне нарощування обсягів їх виробництва. В Європі та світі вводять все більш жорсткі вимоги екологічного стандарту (Євро 6, з 2025 р. Євро 7), на застосування якого до автомобілів і моторних палив пред'являються вимоги, що підвищують їх екологічну безпеку. Однак більшість альтернативних палив самі по собі не можуть розглядатися, як готове до використання моторне паливо. Це пов'язано з тим, що експлуатаційні та екологічні властивості більшості альтернативних палив не відповідають властивостям товарних палив. Вирішення даної проблеми можливе двома основними шляхами:

- 1) поліпшення властивостей альтернативних палив за рахунок їх доопрацювання та очищення;
- 2) використання сумішей альтернативних палив з товарними паливами в певних співвідношеннях, які не нашкодять ні двигуну, ні навколишньому середовищу.

Велика увага науковців направлена на дослідження біодизельного палива на основі ріпаку. З рослин, придатних для виготовлення біопалива, в Україні найбільша посівна площа у пшениці та соняшнику. Вирощується також ріпак ярий та ріпак озимий, соя, кукурудза та цукровий буряк. Майже всі ці рослини, крім сої та пшениці, становлять небезпеку для ґрунту. Тому, виходячи з наведеного вище, більш перспективними для отримання біодизельного палива є соя.

Перед початком дослідження навантажувальної характеристики дизельного двигуна Д21А1 встановлювали важіль включення передач коробки передач на пряму передачу (четверта передача).

Проведення випробовування дизельного двигуна здійснювали за навантажувальною характеристикою під час зміни числа обертів двигуна від 800 до 2000 об/хв.

До початку випробувань дизельний двигун прогрівали до температури оливи не менше ніж 40°C.

Ключові слова: дизельний двигун, біодизель, коефіцієнт корисної дії, паливна ефективність, потужність двигуна.

ВСТУП

Біодизельне паливо, отримане з відновлюваних ресурсів, останнім часом робить його більш привабливим для використання на ДВЗ. День за днем світ модернізується та розвивається. Наслідком є зростання кількості автомобілів і ДВЗ. Однак запаси джерел енергії, які використовуються в цих двигунах є обмеженими і постійно вичерпуються. Це призводить до необхідності пошуку альтернативних видів дизельних палив.

Біодизель — це складний ефір жирної кислоти з довгим ланцюгом, виготовлений із оновленої та біологічної сировини, такої як використана олія, тваринний жир, рослинна олія та водорості.

Біодизель є відновлюваним і чистим паливом, оскільки воно зменшує викиди оксиду вуглецю, вуглекислого газу, вуглеводнів і твердих частинок порівняно з дизельним паливом на основі нафти.

Виробництво біодизеля з відновлюваних ресурсів здійснюється за допомогою реакції переестерифікації, під час якої органічна група (алкіл) спирту заміщується органічною групою тригліцериду – основного компонента вихідної сировини, утворюючи алкіловий ефір жирної кислоти (біодизель) і сирий гліцерин.

Біодизель можна використовувати в чистому вигляді (B100) або змішувати з нафтовим дизелем у будь-якій концентрації, якщо його специфікації ідентичні специфікаціям міжнародного стандарту, наданим Американським стандартом для тестування матеріалів (ASTM) або EN14214 в Європейському Союзі для альтернативних видів палива.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В роботі [1], виконано аналіз основних видів альтернативного палива для дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), досліджено їх основні показники та здійснено оцінку основних фізико-хімічних показників найпоширеніших видів біодизельного палива і описані необхідні умови для їх застосування у ДВЗ. Проте, з виконаних досліджень не можна оцінити вплив добавок SME на характер та закономірність зміни основних техніко-експлуатаційних показників отриманого біодизельного палива.

Робота [2] присвячена аналізу фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей біодизельного палива на основі етилових естерів жирних кислот рижієвої олії та сумішевих біодизельних палив із

різним відсотковим вмістом етилових естерів. Проведено порівняльний аналіз зразків біодизельних палив на основі метилових і етилових естерів жирних кислот ріпакової та ріжівської олії. У результаті дослідження обґрунтовано використання ріжівської олії для виробництва біодизельного палива, а саме для повної або часткової заміни традиційного нафтового дизельного палива.

Дослідження впливу біодизельного палива на токсичність ДВЗ виконано у роботі [3]. Авторами запропоновано ряд заходів з покращення екологічних показників дизельного ДВЗ та досліджено їх вплив на потужність та економічність. Найперспективнішими заходами щодо підвищення екологічних показників ДВЗ виявилися оптимізація кута випередження впорскування палива та оптимізація мінімальної величини коефіцієнта надлишку повітря в результаті чого викиди діоксидів азоту знизилися на 63 %, а його димність на 78 %.

В роботі [4] розглянуто основні паливо-мастильні властивості біодизеля в порівнянні зі звичайним дизельним паливом, його вплив на потужність двигуна. Також автори проаналізували витрати палива і теплову ефективність біодизеля, в порівнянні зі звичайним дизельним паливом та дослідили показники викидів біодизельного і дизельного палива. За результатами досліджень встановлено, що при використанні біодизельного палива в двигунах збільшуються викиди оксиду азоту, але їх можна контролювати шляхом прийняття певних рішень, таких як додавання метанового поліпшувача, затримки впорскування, рециркуляції вихлопних газів і т.д.

Широкомасштабні дослідження біодизельного палива виконано авторами [5]. Ними встановлено, що робота дизеля на біодизельному паливі з більш високою густиною та кінематичною в'язкістю супроводжується зростанням максимальної потужності та крутного моменту, а також підвищенням витрати палива. При цьому також підвищується концентрація оксидів азоту в відпрацьованих газах та зростає димність.

У роботі [6] розглядається можливість використання сивушного спирту як додатку до моторного дизельного палива. Наведено результати експериментальних досліджень дизелів, що працюють на суміші дизельного палива і сивушних масел. За результатами досліджень покращено паливні та екологічні показники двигунів, що працюють на суміші дизельного палива і сивушних масел. Проте, сивушні масла несуть і негативний вплив для елементів системи живлення двигуна, оскільки містять до 8 % води, що не допустимо для дизельного палива.

Автори [7] досліджують процес виробництва біодизельного палива, зокрема вплив капіталовкладень на собівартість вартість виробництва палива. Результати показують, що основна складова вартості біодизельного палива – ціна сировини. А, отже знизивши собівартість виробництва сировини можна досягнути економічної ефективності використання соєвої олії для виробництва біодизельного палива.

Аналогічні дослідження собівартості виробництва целюлозного етанолу, розробленого та перевіреного Університетом Флориди в лабораторних, пілотних і демонстраційних масштабах виконані в [8]. Мінімальна відпускна ціна етанолу коливалася від 50,38 до 62,72 центів США/л. Основний внесок у собівартість виробництва внесли вихідна сировина та капітальні витрати, які становили від 23-28% до 40-49% відповідно. Ці висновки свідчать про те, що майбутні зусилля з підвищення економічної доцільності процесу целюлозного етанолу повинні зосередитися на оптимізації для отримання найвищого виходу етанолу.

У роботі [9] в процесі використання біодизельного палива RME B100 на двигуні Renault 2.5 DCI встановлено збільшення середнього діаметру крапель палива; зафіксовано збільшення далекобійності струменя і зменшення його ширини; контур факела набуває конусної форми; спостерігається загострення при його вершині.

Можна припустити існування надзбагаченої серцевини струменя, що призводить до зменшення кут розкриття факела. Перераховані фактори призводять до погіршення розподілу палива по зонах факела розпилення. Тільки 50 % палива знаходиться в оболонці струменя, що призводить до погіршеного змішуванні палива з повітрям. У ядрі стінки знаходиться 18 % палива, яке буде розтікатися по стінках і погано змішуватися з повітрям. Решта палива (36 %) буде знаходитися в ядрі струменя, на фронті вільного струменя та зонах перетину пристінних потоків, і частково візьме участь у сумішоутворенні. Це свідчить, що використання RME у чистому вигляді призводить до запізнення тепловиділення на 18 – 20 градусів повороту колінчастого валу.

А, отже використання SME та RME без зміни конструкції системи живлення ДВЗ можливе тільки у сумішах з товарним паливом у пропорціях до 60 % мас.

Теоретичні дослідження робочого циклу біодизельного двигуна здійснені у роботі [10]. За результатами дослідження робочого циклу дизеля встановлено, що живлення двигуна біодизельним

палив на основі SME та RME в порівнянні з використанням мінерального палива, характеризується зменшенням швидкості тепловиділення та збільшенням тривалості процесу згоряння, що призводить до незначного погіршення індикаторного ККД. Проте, зазначені чинники сприяють зниженню кількості оксиду азоту, що утворюється у камері згоряння дизеля, а зміна іншого індикаторного показника біодизельного палива, зменшення тривалості періоду затримки займання палива сприяє зниженню рівня шуму та димності відпрацьованих газів дизеля [10].

Біодизель – це алкіловий ефір, виготовлений із відновлюваної сировини, наприклад відходів тваринного жиру, рослинної олії та водоростей. Крім того, біодизель за складом і властивостями порівнянний з нафтодизелем табл. 1.[11].

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика ДП і SME

Назва показника	Значення для ДП згідно ДСТУ 7688:2015	Біодизельне паливо, SME
Вміст компонентів:		
С	0,87	0,7731
Н	0,126	0,1188
О	0,004	0,1081
Нижча теплота згоряння, мДж	42,5	36,22
Вміст сірки, %	0,01	0,005
Цетанове число, не менше	51	51-65
Густина, кг/м ³	835	885
Температура спалаху, °С	60-80	100-170

Дизельне або петродизельне паливо – це невідновлюване викопне паливо, яке отримують із сирої нафти і, ймовірно, буде вичерпано в майбутньому [12]. Оскільки дизельне паливо виробляється з невідновлюваних ресурсів, це призводить до зростання витрат на енергію, особливо через падіння видобутку сирої нафти [13]. У той час як біодизель виробляється із вихідної сировини за допомогою реакції переестерифікації, яка включає обмін гліцеридів (основного компонента вихідної сировини) органічною групою на органічну групу спирту для виробництва біодизеля та гліцерину як побічного продукту [14, 15]. У табл. 1.1 наведено склад і властивості біодизеля, а також товарного дизельного палива [16, 17].

Біодизель є одним із поширених видів біопалива, яке використовується в багатьох країнах, воно використовується у великих кількостях у США, Бразилії, Індонезії, Малайзії, Франції, Німеччині та інших європейських країнах. Світове виробництво біодизеля зросло з 3,5 мільйонів тон у 2005 році до 16 мільйонів тон у 2010 році, досягло 29 мільйонів тон у 2016 році та, як очікується, перевищить 36,5 мільйонів тон у 2025 році [18].

Багато експертів припускають, що глобальне виробництво біодизеля буде збільшено, щоб задовольнити майбутні потреби в біодизелі, які становитимуть близько 277 мільйонів тон на рік до 2050 року [19, 20].

Екологічно-чисте горіння, хороша ефективність змащування, низький вміст ароматичних речовин, низький вміст сірки, високе цетанове число та низька температура застигання позитивно характеризують біодизель над товарним дизельним паливом.

Хороші властивості біодизеля зменшують викиди твердих частинок (РМ), оксиду вуглецю (СО) і вуглеводнів (НС) у вихлопних газах. Тому біодизель є екологічно чистим паливом [21, 22].

Сировина є дуже важливою перспективою в біодизельній промисловості, оскільки вартість біодизеля значною мірою залежить від переробленої сировини, що використовується. Сьогодні вихідна сировина становить щонайменше 80 % витрат, пов'язаних з виробництвом біодизеля [23].

Близько 95% виробництва біодизеля в усьому світі виробляється з харчових олій, що вважається непотрібним статусом, оскільки світ переживає продовольчу проблему [24].

Тому зараз новим трендом є виготовлення біодизеля з дешевої нехарчової олії [25].

Деякі види сировини відрізняються високою продуктивністю у виробництві біодизеля через високий вміст тригліцеридів, такі як пальма, ятрофа, мікроводорості, кокосова олія та відпрацьована кулінарна олія [26].

Сировину для біодизелю можна розділити на дві основні категорії, як показано нижче [27]:

- харчова рослинна олія: соєва, арахісова, соняшникова, пальмова, кокосова;

- нехарчова рослинна олія: рапсова, ятрофова, відпрацьована кулінарна олія.

Біодизель виробляють з рослинної олії за допомогою реакції переестерифікації, яка є реакцією тригліцеридів зі спиртом у визначений час, температуру, швидкість змішування та в присутності каталізатора, утворюючи алкілові ефіри жирних кислот (біодизель) і неочищений гліцерин [28,29].

Метанол, етанол або бутанол є основними спиртами, які використовуються в реакціях переестерифікації [30]. Існує чотири типи реакцій переестерифікації [29, 31]:

- лужний каталізатор;
- кислотний каталізатор;
- ферментний каталізатор;
- некаталізована суперкритична переестерифікація метанолу.

У промисловості лужна або основно-каталізована переестерифікація є найпоширенішим процесом, оскільки це найпростіший і найшвидший процес [32, 33].

Вільні жирні кислоти (ВЖК) є небажаними сполуками у вихідній сировині, оскільки вони реагують з основним каталізатором, утворюючи солі карбонових кислот (мило) і воду. Реакція милоутворення є найбільшою перешкодою для біодизельної промисловості, оскільки мило скорочує вихід біодизеля, підвищує в'язкість продуктів, утворює емульсії та ускладнює відділення гліцерину від біодизеля [34]. Тому високий вміст ВЖК руйнує реакцію переестерифікації.

Сировина з ВЖК більше 1 % не обробляється безпосередньо базовим каталізатором переестерифікації, а тому, до вихідної сировини повинні застосовуватися додаткові етапи обробки. І, навпаки, вихідна сировина з ВЖК менше 1 % можна обробити безпосередньо.

У промисловому застосуванні кислотна естерифікація є найпоширенішим процесом обробки для зменшення ВЖК. Етерифікація гліцерину або гліцероліз є ефективним процесом для зменшення вмісту ВЖК, але він не відомий як кислотна етерифікація. Гліцероліз здатний зменшити ВЖК у сировині низької якості за відсутності етапів метанолу та вакуумної десорбції [36].

Кислотна обробка здійснюється шляхом реакції спирту з ВЖК з використанням кислоти як каталізатора для отримання біодизеля та води, таким чином вміст ВЖК знижується. Цей процес обробки застосовують у разі вмісту ВЖК у сировині більше 1 % [37]. При кислотній обробці один моль метанолу реагує з одним молем ВЖК для досягнення реакції, тому для завершення реакції потрібна велика кількість метанолу [36].

Гліцероліз або етерифікація гліцерину – це процес обробки, який має здатність перетворювати ВЖК на гліцериди. Гліцероліз включає реакцію ВЖК і гліцерину з утворенням гліцеридів і води. Утворені гліцериди потім перетворюють на біодизель за допомогою лужної переестерифікації [38].

При гліцеролізі потрібна невелика кількість гліцерину, один моль гліцерину достатньо для трьох молей ВЖК [39].

Процес гліцеролізу не є поширеним у виробництві біодизеля, оскільки вимагає використання дорогих металевих каталізаторів при високій температурі, яка може досягати 220 °C [40-42]. Гліцероліз широко використовується в інших галузях промисловості для виробництва поверхнево-активних речовин і емульгаторів, наприклад, у харчовій, косметичній або фармацевтичній промисловості. Неочищений гліцерин – побічний продукт виробництва біодизеля – можна використовувати в реакції гліцеролізу, але після його обробки, оскільки він містить багато домішок і має високий рН.

Біодизель можна виготовляти з понад 300 видів харчових і нехарчових рослинних олій [43, 44]. Більшість цієї сировини має високу продуктивність біодизеля через високу концентрацію тригліцеридів [45].

Харчова олія. Харчова олія виробляється з рослинних ресурсів; використовується в основному для безпосереднього споживання людиною у їжу. Містить різні поживні інгредієнти, тому є здоровою їжею [46].

Видобуток харчової олії з її ресурсів зазвичай не потребує хімічної обробки. Найбільш поширеною харчовою олією, яка використовується для виробництва біодизеля, є пальмова, соєва, соняшникова, рапсова та арахісова олії [25, 47].

Пальмова олія. Пальмова олія є важливою харчовою олією, оскільки від 70% до 90% пальмової олії використовується в харчовій промисловості, а решта використовується в інших галузях [48].

Пальмова олія має високу продуктивність біодизеля, оскільки 1,25 літра пальмової олії виробляє 1 літр біодизеля [49].

Пальмова олія видобувається з насіння пальми, вона також має вміст олії, який досягає 20-21% [50].

Пальмова олія повинна бути оброблена перед реакцією переестерифікації для видалення твердих частинок, води, кольору та запаху, після обробки пальмової олії вміст ВЖК становить 0,1 %.

Малайзія та Індонезія є найбільшими виробниками пальмової олії [26].

Соева олія. Соева олія є життєво важливою харчовою олією через її багато переваг для здоров'я. Світове виробництво соєвої олії становить 222 млн. тон і виробляється в основному в США, Бразилії та Східній Азії. Біодизель виробляється в основному в США з соєвої олії, для виробництва одного літра біодизеля потрібно 1,3 літра соєвої олії [48].

Ріпакова олія. Ріпак – жовта квітка, яку висаджують переважно в Європі та Канаді. Використовується як корм для тварин, ріпакова олія характеризується високою продуктивністю, оскільки з 1,1 літра ріпакової олії виходить 1 літр біодизеля [51].

Нехарчова олія. Нехарчова олія – це олія, яка не є придатною для харчування людей, оскільки вона використовується в основному в промислових цілях, таких як виробництво біопалива, мила, миючих засобів і фарб [46].

Щоб зробити нехарчову олію придатною для певного застосування, необхідні різні хімічні процеси, тому її дешевше використовувати в промислових цілях. Найпоширенішою нехарчовою олією, яка використовується для виробництва біодизеля, є рицина тваринного жиру, ятрофа, жожоба та використана кулінарна олія [25, 47].

Перешкодою для використання нехарчової олії як сировини для біодизеля є велика кількість ВЖК, які реагують з основним каталізатором, утворюючи емульсії та мило, таким чином перешкоджаючи основній реакції переестерифікації [52] і знижуючи вихід біодизельного палива. Тому перед реакцією переестерифікації слід зменшити концентрацію ВЖК [34].

Масло ятрофи. Масло ятрофи отримують з насіння ятрофи. Ятрофа культивується при високій температурі зі стічними водами, тому це перспективний ресурс біодизеля в Єгипті; особливо це основний ресурс біодизеля в Азії та Африці. Олія ятрофи характеризується значною продуктивністю біодизеля, оскільки її насіння містять 30-35 % олії, і цю олію можна перетворити на біодизель [26].

Олія ятрофи також використовується в інших цілях, таких як виробництво мила, косметики та мастильних матеріалів [36].

Рицинова олія. Рицинова олія — безбарвна або слабко-жовта рідина з виразним смаком і запахом. Її температура кипіння 313 °С, густина 961 кг/м³. В'язкість олії приблизно в сім разів перевищує в'язкість інших рослинних олій. Біодизель, виготовлений з рицинової олії, має надзвичайно низьку температуру помутніння та температуру застигання, що робить це біодизель ідеальною альтернативою в зимових умовах, але в'язкість біодизеля з рицинової олії не відповідає міжнародним стандартам біодизельного палива [53, 54].

Відпрацьована олія. Відпрацьована кулінарна олія є багатообіцяючою альтернативою для виробництва біодизеля завдяки численним перевагам. У порівнянні з іншими оліями, використана кулінарна олія характеризується низькою ціною, доступністю, легкістю збирання в будинках і ресторанах і поновлюваністю [26]. Крім того, це мінімізує необхідність використання землі для вирощування біодизельного палива. У багатьох країнах використана кулінарна олія викидається спричиняючи забруднення навколишнього середовища, незважаючи на її важливість у виробництві біодизеля.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для покращення експлуатаційних та екологічних властивостей товарних палив та промислових масштабів виробництва альтернативних сумішевих біодизельних палив з SME (соєвої олії) необхідно удосконалити технологічну схему із застосуванням спеціального обладнання та дослідити основні фізичні та експлуатаційні показники отриманих паливних сумішей, а також техніко-експлуатаційні показники роботи дизельного двигуна на утвореному паливі.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі основні задачі дослідження:

- удосконалення установки для отримання сумішей дизельного палива та SME у необхідному об'ємному співвідношенні;
- дослідження параметрів роботи установки для отримання сумішевих палив необхідного об'ємного складу;
- дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних показників сумішей дизельного палива та SME;

- дослідженні техніко-експлуатаційних показників роботи дизельного двигуна на утворених паливних сумішах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зняття навантажувальної характеристики двигуна Д21А здійснено за постійної частоти обертання колінчастого вала ($n=750$ об/хв.), на попередньо прогрітому двигуні.

З метою мінімального впливу коробки передач на результати експерименту всі випробування дизеля Д21А1 проведені на прямій четвертій передачі.

Під час проведення експерименту умови навколишнього середовища були такими:

- температура навколишнього середовища $t_{\text{нс}}=21$ °С;
- атмосферний тиск, $p=745$ мм.рт.ст.

Роботу компресора під час створення абсолютного тиску повітря p_2 визначали за показником політропи стиску n .

Середня температура повітря на виході з компресора наведена в табл. 2.

Інші необхідні дані для визначення потужності приводу компресора взяті з технічного паспорта компресора.

У табл. 3 наведені результати визначення роботи та потужності, що споживає компресор за різних значень абсолютного тиску повітря p_2 .

Рис. 1 ілюструє одержану залежність потужності приводу компресора – від абсолютного тиску повітря на виході з компресора.

Таблиця 2 – Середня температура повітря на виході з компресора в залежності від створеного компресором абсолютного тиску повітря

Абсолютний тиск повітря на виході з компресора, МПа	Температура повітря на виході з компресора T_2 , °С			
	1	2	3	Середнє значення
0,49	63	64	64	63,7
0,981	67	67	68	67,3
1,47	69	70	70	69,7
1,96	72	72	73	72,3
2,45	76	77	77	75,7
2,94	78	78	78	78

Таблиця 3 – Результати визначення роботи та потужності приводу компресора

Абсолютний тиск повітря на виході з компресора, МПа	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45
Робота компресора, МДж	25,3	36,4	42,9	47,7	51,5
Потужність приводу ДВЗ Д21А1, кВт	9	13	15,3	17	18,4

При знятті навантажувальних характеристик дизеля Д21А1 заданий швидкісний режим підтримується зміною кількості палива, яка подається паливним насосом високого тиску в циліндри. Кількість повітря яке поступає в циліндр дизеля від навантаження практично не залежить, хоча при його зменшенні дещо знижується коефіцієнт наповнення внаслідок підвищення температурного режиму двигуна.

Робота дизеля Д21А1 в режимі холостого ходу характеризується високим коефіцієнтом надлишку повітря, індикаторним ККД і низькою індикаторною питомою витратою палива.

При збільшенні навантаження зростає циклова подача палива, що приводить до зниження коефіцієнта надлишку повітря. Але оскільки при малих і середніх навантаженнях величина цього коефіцієнта достатньо велика і значно перевищує межі димності, то індикаторний ККД не дуже змінюється.

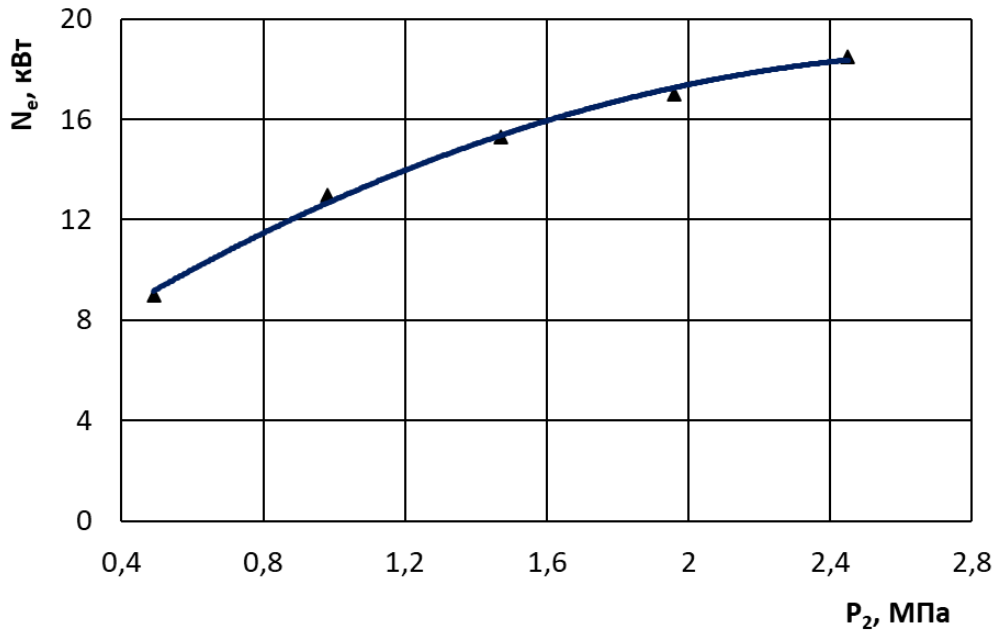


Рисунок 1 – Залежність потужності приводу компресора N_e двигуна Д21А1 від абсолютного тиску повітря p_2 на виході з компресора

На рис. 2 наведено залежність зміни крутного моменту двигуна Д21А1 в залежності від розвинутої потужності двигуна.

Результати досліджень зміни G_t , g_e двигуна Д21А1 в залежності від розвинутої потужності двигуна на різних паливних сумішах SME та ДП наведено на рис. 3 та 4

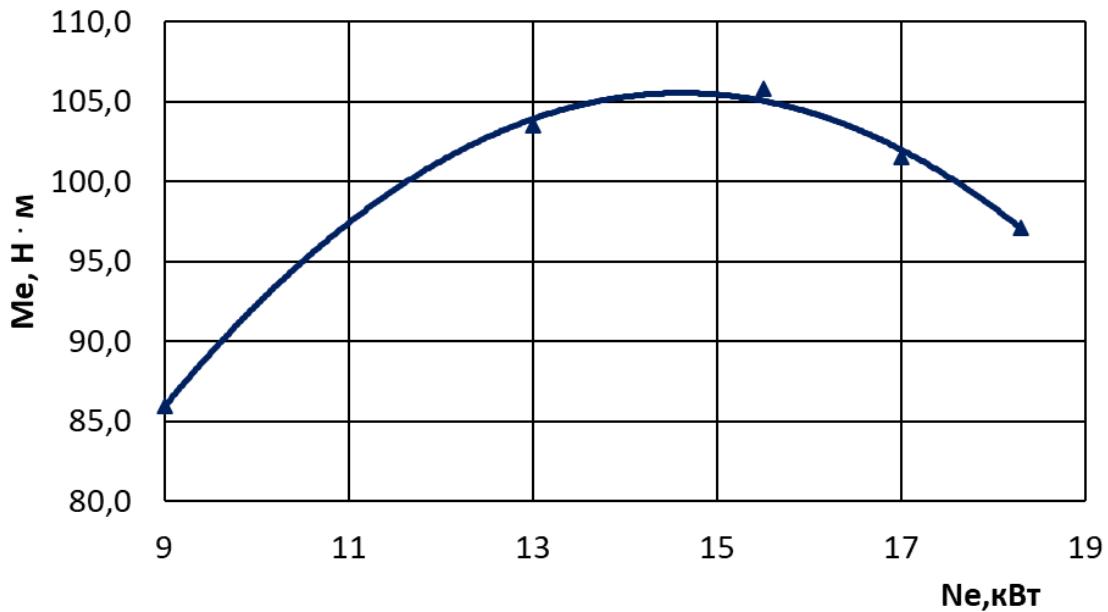


Рисунок 2 – Експериментальні залежності крутного моменту M_e двигуна Д21А1 від його навантаження N_e

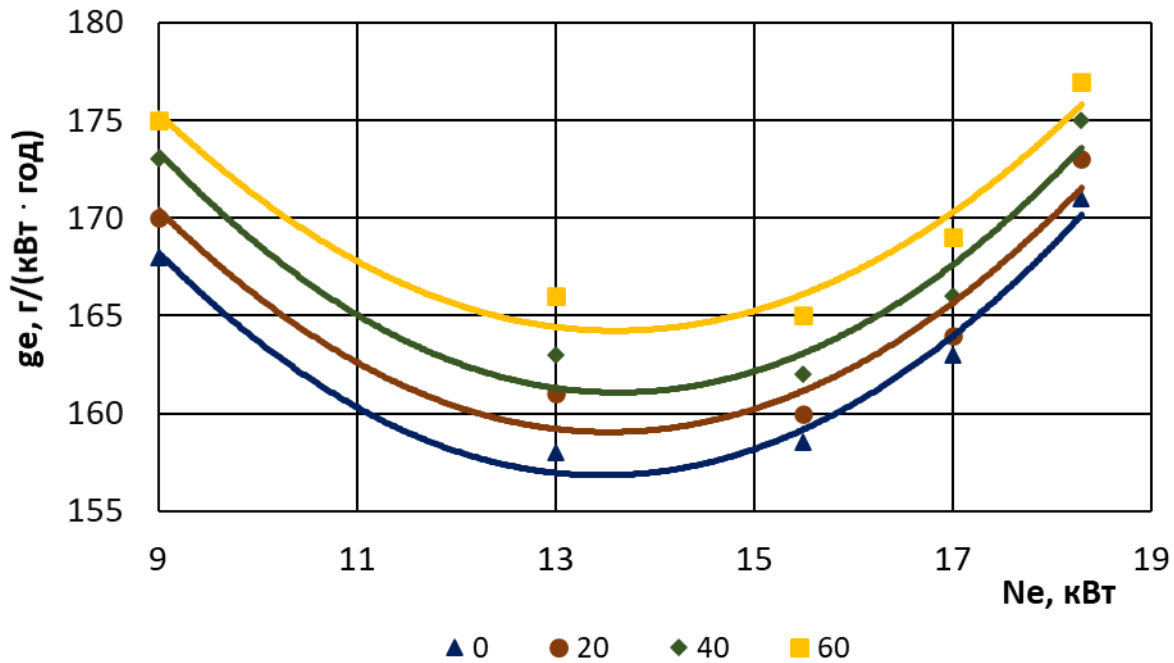


Рисунок 3 – Експериментальні залежності питомої ефективної витрати палива g_e двигуна Д21А1 від його навантаження Ne за різних значень вмісту SME у дизельному паливі

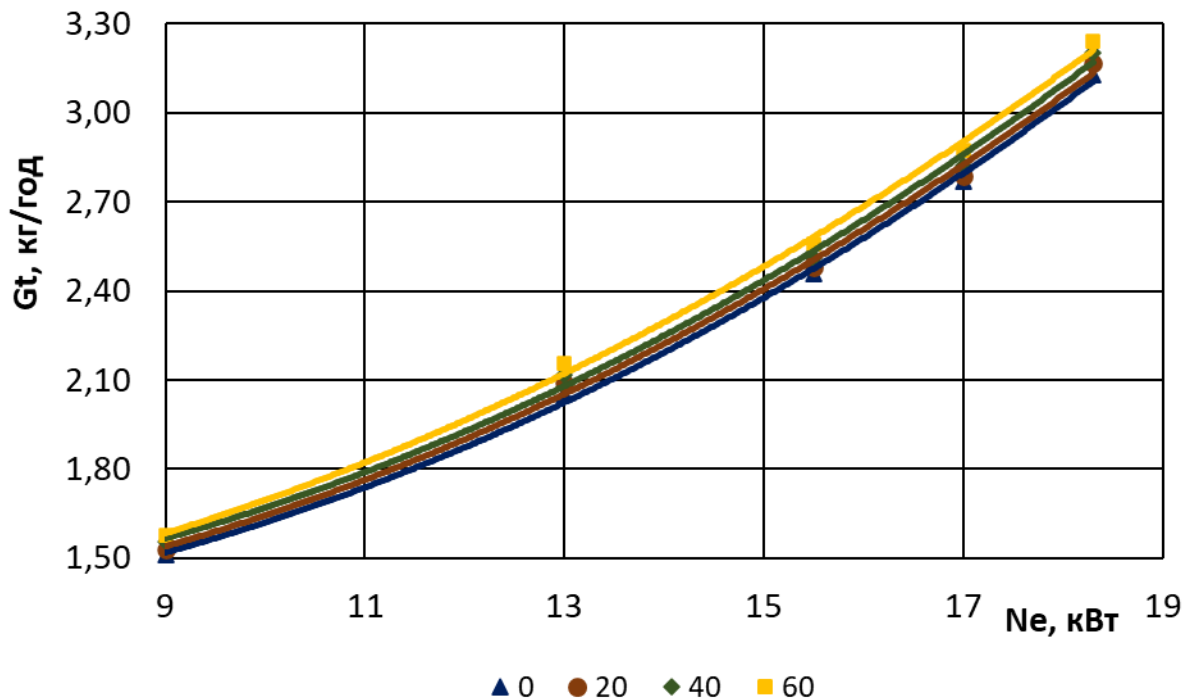


Рисунок 4 – Експериментальні залежності годинної витрати палива G_t двигуна Д21А1 від його навантаження Ne за різних значень вмісту SME у дизельному паливі

Одержані залежності (рис. 1-4) апроксимуються наступними поліномами:

$$M_e = -27,383 - 0,6223 \cdot Ne^2 + 18,19 \cdot Ne, \quad (1)$$

$$g_e = a_1 + b_1 \cdot Ne^2 - b_2 \cdot Ne, \quad (2)$$

$$G_t = a_2 + b_3 \cdot Ne^2 - b_4 \cdot Ne, \quad (3)$$

Дослідні коефіцієнти для рівнянь (2) і (3) наведено в табл. 4

Таблиця 4 – Дослідні коефіцієнти для рівнянь (2) і (3)

Витрата палива	Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів за вмісту SME, % об.			
		0	20	40	60
g_e	a_1	260,62	260,44	268,09	261,58
	b_1	0,572	0,5529	0,5759	0,5258
	b_2	15,41	14,976	15,702	14,309
G_t	a_2	1,3604	1,3384	1,3893	1,2678
	b_3	0,0084	0,0081	0,0083	0,0076
	b_4	0,0576	0,0508	0,0554	0,0336

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Питома ефективна витрата палива g_e в зоні низьких і середніх навантажень знижується в основному в результаті підвищення механічного ККД. В зоні навантажень близьких до повного зниження коефіцієнта надлишку повітря приводить до зниження індикаторного ККД і до збільшення індикаторної питомої витрати палива.

Аналіз графічних залежностей на рис 4.4 та 4.5 свідчить, що на режимі навантаження спостерігається зростання питомої ефективної та годинної витрати палива на 5,5 та 4,8 % відповідно. Це пояснюється зниженням нижчої теплоти згоряння паливних сумішей дизельного палива з SME у порівнянні із товарним дизельним паливом.

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження устаткування для споживання створених альтернативних палив з вмістом SME – двигун Д21А1 засвідчили можливість їхньої повноцінної експлуатації без будь-яких конструктивних змін у разі використання сумішей ДП з вмістом SME до 60 %. Це сприятиме широкому використанню цих альтернативних палив не тільки на автомобілях, але й на інших транспортних, сільськогосподарських, будівельних машинах тощо.

Аналіз навантажувальної характеристики двигуна Д21А1 на паливних сумішах ДП та SME свідчить, що на режимі навантаження спостерігається зростання питомої ефективної та годинної витрати палива на 5,5 та 4,8 % відповідно. Це пояснюється зниженням нижчої теплоти згоряння паливних сумішей дизельного палива з SME у порівнянні із товарним дизельним паливом.

Визначені експериментальним шляхом експлуатаційні характеристики двигуна Д21А1 сприятимуть практичному використанню створених і досліджених у роботі альтернативних палив з вмістом SME.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мельник В. М. Дослідження основних техніко-експлуатаційних характеристик альтернативних видів палива для дизельних ДВЗ / В. М. Мельник, Т. Й. Войцехівська, А. Р. Сумер // Наукові праці ВНТУ. – 2018. – №2. – С. 1-13.
2. Яковлева А. В. Фізико-хімічні властивості біодизельних палив на основі етилових естерів рижієвої олії / А. В. Яковлева, С. В. Бойченко, А. В. Гудзь, С. О. Зубенко // Каталіз та нафтохімія. – 2020. – № 29. – С. 24-30.
3. Левтеров А. М. Покращення екологічних характеристик дизеля, що працює на біодизельних паливних композиціях / А. М. Левтеров, В. Д. Савицький // Автомобільний транспорт. – 2015. – № 36. – С. 110-117.
4. Журенко Ю. І. Біодизель - альтернативна заміна дизельного палива / Ю. І. Журенко, В. М. Яропуд, І. А. Бабін // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2012. – № 10 (58). – С. 44-51.
5. Корпач А.О. Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей біодизельного палива на паливну економічність, енергетичні та екологічні показники автомобільного дизеля / А. О. Корпач, О.О. Левківський // Вісник ЖДТУ. – 2016. – № 2 (77). – С. 115-121.
6. Kryshchop S., Kryshchop L., Melnyk V., Prunko I., Demianchuk Y. Experimental research on diesel engine working on a mixture of diesel fuel and fusel oils. Transport Problems, 2017, 12 (2), P. 53–63.
7. Tang Zhang-Chun, Zhenzhou Lu, Zhiwen Liu, Ningcong Xiao. Uncertainty analysis and global sensitivity analysis of techno-economic assessments for biodiesel production. Bioresource Technology, 2015, Volume 175, Pages 502 – 508.

8. Gubicza Krisztina, Nieves Ismael U., Sagues William J., Barta Zsolt, Shanmugam K.T., Ingram, Lonnie O. Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a Liquefaction plus Simultaneous Saccharification and co-Fermentation process. *Bioresource Technology*, 2015, Volume 208, Pages 42 – 48.
9. Мельник В. М. Дослідження параметрів сумішо- і теплоутворення дизеля у процесі використання альтернативних палив / В. М. Мельник, М. М. Лях, М. М. Синоверський // *Нафтогазова енергетика*. – 2020. – №1 (33). – С. 109-123.
10. Левтеров А.М. Теоретичні дослідження робочого циклу біодизельного двигуна / А.М. Левтеров, А.Н. Авраменко, В.Д. Савицький // *Автомобільний транспорт*. – 2016. – №38. – С. 75-82.
11. Kirubakaran, M. and V.A.M. Selvan, A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82: p. 390-401(2018.)
12. Vonortas, A. and N. Papayannakos, Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(1): p. 3-23(2014.)
13. Verma, P. and M. Sharma, Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62: p. 1063-71(2016.)
14. Alptekin, E., M. Canakci, and H. Sanli. Methyl ester production from chicken fat with high FFA. in *World Renewable Energy Congress-Sweden*; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. 2011. Linköping University Electronic Press.
15. Jansri, S., et al., Kinetics of methyl ester production from mixed crude palm oil by using acid-alkali catalyst. *Fuel processing technology*, 92(8): p. 1543-8(2011.)
16. Latif, M.A.A., et al. Nanostructure and oxidation properties investigation of engine using *Jatropha* biodiesel as engine fuel. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
17. Tziourtzioumis, D.N. and A.M. Stamatelos, Investigation of the effect of biodiesel blends on the performance of a fuel additive-assisted diesel filter system. *International Journal of Engine Research*, 15(4): p. 406-20(2014.)
18. Rouhany, M. and H. Montgomery, *Global Biodiesel Production: The State of the Art and Impact on Climate Change*, in *Biodiesel*. 2019, Springer. p. 1-14.
19. Mishra, V.K. and R. Goswami, A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*, 9(2): p. 273-89(2018.)
20. Živković, S. and M. Veljković, Environmental impacts the of production and use of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1): p. 191-9(2018.)
21. Giakoumis, E.G., Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable energy*, 126: p. 403-19(2018.)
22. El-Gharbawy, A.S.A.A., *PRODUCTION OF BIODIESEL FROM NON EDIBLE VEGETABLE OIL*. 2016
23. Azizian, H. and J.K. Kramer, A rapid method for the quantification of fatty acids in fats and oils with emphasis on trans fatty acids using Fourier transform near infrared spectroscopy (FT- NIR). *Lipids*, 40(8): p. 855-67(2005.)
24. Balat, M., Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. *Energy conversion and management*, 52(2): p. 1479-92(2011.)
25. Gui, M.M., K. Lee, and S. Bhatia, Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, 33(11): p. 1646-53(2008.)
26. Rincón, L., J. Jaramillo, and C. Cardona, Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, 69: p. 479-87(2014.)
27. Ambat, I., V. Srivastava, and M. Sillanpää, Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 90: p. 356-69(2018.)
28. Demirbas, A., Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy conversion and management*, 49(1): p. 125-30(2008.)
29. Leung, D.Y., X. Wu, and M. Leung, A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4): p. 1083-95(2010.)
30. Likozar, B. and J. Levec, Transesterification of canola, palm, peanut, soybean and sunflower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. *Applied Energy*, 123: p. 108-20(2014.)

31. Demirbas, A., Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy conversion and management*, 50(4): p. 923-7(2009.)
32. Elgharbawy, A.S.A.A., cost analysis for biodiesel production from waste cooking oil plant in Egypt. *International Journal of Smart Grid-ijSmartGrid*, 1(1): p. 16-25(2017.)
33. Elgharbawy, A.S., et al., Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks. *Fuel*, 284: p. 118970(2021.)
34. Ramadhas, A.S., S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*, 84(4): p. 335-40(2005.)
35. Van Gerpen, J., Biodiesel processing and production. *Fuel processing technology*, 86(10): p. 1097-107(2005.)
36. Atadashi, I., et al., Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5): p. 3275-85(2012.)
37. Knothe, G., J.H. Van Gerpen, and J. Kahl, *The biodiesel handbook*. Vol. 1. 2005: AOCS press Champaign, IL.
38. Anderson, E., et al., Glycerin esterification of scum derived free fatty acids for biodiesel production. *Bioresource technology*, 200: p. 153-60(2016.)
39. Tan, H., A.A. Aziz, and M. Aroua, Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27: p. 118-27(2013.)
40. Kombe, G.G., et al., Pre-treatment of high free fatty acids oils by chemical re-esterification for biodiesel production—a review. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2013(2013.)
41. Felizardo, P., et al., Study on the glycerolysis reaction of high free fatty acid oils for use as biodiesel feedstock. *Fuel Processing Technology*, 92(6): p. 1225-9(2011.)
42. Díaz, I., et al., Synthesis of MCM-41 materials functionalised with dialkylsilane groups and their catalytic activity in the esterification of glycerol with fatty acids. *Applied Catalysis A: General*, 242(1): p. 161-9(2003.)
43. Sani, Y., W. Daud, and A. Abdul Aziz, Biodiesel feedstock and production technologies: Successes, challenges and prospects. *Biodiesel-Feedstocks, Production, and Applications*, 10: p. 52790(2012.)
44. Gebremariam, S. and J. Marchetti, Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 168: p. 74-84(2018.)
45. Gnanaprakasam, A., et al., Recent strategy of biodiesel production from waste cooking oil and process influencing parameters: a review. *Journal of Energy*, 2013(2013.)
46. Bhuiya, M., et al., Second generation biodiesel: potential alternative to-edible oil-derived biodiesel. *Energy Procedia*, 61: p. 1969-72(2014.)
47. Pragma, N., K.K. Pandey, and P. Sahoo, A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24: p. 159-71(2013.)
48. Karmakar, A., S. Karmakar, and S. Mukherjee, Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource technology*, 101(19): p. 7201-10(2010.)
49. Riazi, M. and D. Chiaramonti, *Biofuels production and processing technology*. 2017: CRC Press.
50. Sumathi, S., S. Chai, and A. Mohamed, Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9): p. 2404-21(2008.)
51. Demirbas, A., Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*, 35(9): p. 4661-70(2007.)
52. Baskar, G. and R. Aiswarya, Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57: p. 496-504(2016.)
53. Demirbas, A., et al., Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(2): p. 290-318(2016.)
54. Banković-Ilić, I.B., O.S. Stamenković, and V.B. Veljković, Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(6): p. 3621-47(2012.)

REFERENCES

1. Melnyk V. M. Doslidzhennia osnovnykh tekhniko-eksploatatsiynykh kharakterystyk alternatyvnykh vydiv palyva dlia dyzelnykh DVZ / V. M. Melnyk, T. Y. Voitsekhivska, A. R. Sumer // *Naukovi pratsi VNTU*. – 2018. – №2. – S. 1-13.

2. Yakovlieva A. V. Fizyko-khimichni vlastyivosti biodyzelnykh palyv na osnovi etylovykh esteriv ryzhiievoi olii / A. V. Yakovlieva, S. V. Boichenko, A. V. Hudz, S. O. Zubenko // *Kataliz ta naftokhimiia*. – 2020. – № 29. – S. 24-30.
3. Lievtierov A. M. Pokrashchennia ekolohichnykh kharakterystyk dyzelia, shcho pratsiuie na biodyzelnykh palyvnykh kompozytsiakh / A. M. Lievtierov, V. D. Savytskyi // *Avtomobilnyi transport*. – 2015. – № 36. – S. 110-117.
4. Zhurenko Yu. I. Biodyzel - alternatyvna zamina dyzelnoho palyva / Yu. I. Zhurenko, V. M. Yaropud, I. A. Babyn // *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. – 2012. – № 10 (58). – S. 44-51.
5. Korpach A.O. Doslidzhennia vplyvu fizyko-khimichnykh vlastyvostei biodyzelnoho palyva na palyvnu ekonomichnist, enerhetychni ta ekolohichni pokaznyky avtomobilnoho dyzelia / A. O. Korpach, O.O. Levkivskyi // *Visnyk ZhDTU*. – 2016. – № 2 (77). – S. 115-121.
6. Kryshchop S., Kryshchop L., Melnyk V., Prunko I., Demianchuk Y. Experimental research on diesel engine working on a mixture of diesel fuel and fusel oils. *Transport Problems*, 2017, 12 (2), R. 53–63.
7. Tang Zhang-Chun, Zhenzhou Lu, Zhiwen Liu, Ningcong Xiao. Uncertainty analysis and global sensitivity analysis of techno-economic assessments for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 2015, Volume 175, Pages 502 – 508.
8. Gubicza Krisztina, Nieves Ismael U., Sagues William J., Barta Zsolt, Shanmugam K.T., Ingram, Lonnie O. Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a Liquefaction plus Simultaneous Saccharification and co-Fermentation process. *Bioresource Technology*, 2015, Volume 208, Pages 42 – 48.
9. Melnyk V. M. Doslidzhennia parametriv sumisho- i teploutvorennia dyzelia u protsesi vykorystannia alternatyvnykh palyv / V. M. Melnyk, M. M. Liakh, M. M. Synoverskyi // *Naftohazova enerhetyka*. – 2020. – №1 (33). – S. 109-123.
10. Lievtierov A.M. Teoretychni doslidzhennia robochoho tsykladu biodyzelnoho dvyhuna / A.M. Lievtierov, A.N. Avramenko, V.D. Savytskyi // *Avtomobilnyi transport*. – 2016. – №38. – S. 75-82.
11. Kirubakaran, M. and V.A.M. Selvan, A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82: p. 390-401(2018.)
12. Vonortas, A. and N. Papayannakos, Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(1): p. 3-23(2014.)
13. Verma, P. and M. Sharma, Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62: p. 1063-71(2016.)
14. Alptekin, E., M. Canakci, and H. Sanli. Methyl ester production from chicken fat with high FFA. in *World Renewable Energy Congress-Sweden*; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. 2011. Linköping University Electronic Press.
15. Jansri, S., et al., Kinetics of methyl ester production from mixed crude palm oil by using acid-alkali catalyst. *Fuel processing technology*, 92(8): p. 1543-8(2011.)
16. Latif, M.A.A., et al. Nanostructure and oxidation properties investigation of engine using Jatropha biodiesel as engine fuel. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
17. Tziourtzioumis, D.N. and A.M. Stamatelos, Investigation of the effect of biodiesel blends on the performance of a fuel additive-assisted diesel filter system. *International Journal of Engine Research*, 15(4): p. 406-20(2014.)
18. Rouhany, M. and H. Montgomery, *Global Biodiesel Production: The State of the Art and Impact on Climate Change*, in *Biodiesel*. 2019, Springer. p. 1-14.
19. Mishra, V.K. and R. Goswami, A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*, 9(2): p. 273-89(2018.)
20. Živković, S. and M. Veljković, Environmental impacts the of production and use of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1): p. 191-9(2018.)
21. Giakoumis, E.G., Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable energy*, 126: p. 403-19(2018.)
22. El-Gharbawy, A.S.A.A., *Production of biodiesel from non edible vegetable OIL*. 2016
23. Azizian, H. and J.K. Kramer, A rapid method for the quantification of fatty acids in fats and oils with emphasis on trans fatty acids using Fourier transform near infrared spectroscopy (FT- NIR). *Lipids*, 40(8): p. 855-67(2005.)

24. Balat, M., Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. *Energy conversion and management*, 52(2): p. 1479-92(2011.)
25. Gui, M.M., K. Lee, and S. Bhatia, Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, 33(11): p. 1646-53(2008.)
26. Rincón, L., J. Jaramillo, and C. Cardona, Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, 69: p. 479-87(2014.)
27. Ambat, I., V. Srivastava, and M. Sillanpää, Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 90: p. 356-69(2018.)
28. Demirbas, A., Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy conversion and management*, 49(1): p. 125-30(2008.)
29. Leung, D.Y., X. Wu, and M. Leung, A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4): p. 1083-95(2010.)
30. Likozar, B. and J. Levec, Transesterification of canola, palm, peanut, soybean and sunflower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. *Applied Energy*, 123: p. 108-20(2014.)
31. Demirbas, A., Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy conversion and management*, 50(4): p. 923-7(2009.)
32. Elgharbawy, A.S.A.A., cost analysis for biodiesel production from waste cooking oil plant in Egypt. *International Journal of Smart Grid-ijSmartGrid*, 1(1): p. 16-25(2017.)
33. Elgharbawy, A.S., et al., Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks. *Fuel*, 284: p. 118970(2021.)
34. Ramadhas, A.S., S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*, 84(4): p. 335-40(2005.)
35. Van Gerpen, J., Biodiesel processing and production. *Fuel processing technology*, 86(10): p. 1097-107(2005.)
36. Atadashi, I., et al., Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5): p. 3275-85(2012.)
37. Knothe, G., J.H. Van Gerpen, and J. Kahl, *The biodiesel handbook*. Vol. 1. 2005: AOCS press Champaign, IL.
38. Anderson, E., et al., Glycerin esterification of scum derived free fatty acids for biodiesel production. *Bioresource technology*, 200: p. 153-60(2016.)
39. Tan, H., A.A. Aziz, and M. Aroua, Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27: p. 118-27(2013.)
40. Kombe, G.G., et al., Pre-treatment of high free fatty acids oils by chemical re-esterification for biodiesel production—a review. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2013(2013.)
41. Felizardo, P., et al., Study on the glycerolysis reaction of high free fatty acid oils for use as biodiesel feedstock. *Fuel Processing Technology*, 92(6): p. 1225-9(2011.)
42. Díaz, I., et al., Synthesis of MCM-41 materials functionalised with dialkylsilane groups and their catalytic activity in the esterification of glycerol with fatty acids. *Applied Catalysis A: General*, 242(1): p. 161-9(2003.)
43. Sani, Y., W. Daud, and A. Abdul Aziz, Biodiesel feedstock and production technologies: Successes, challenges and prospects. *Biodiesel-Feedstocks, Production, and Applications*, 10: p. 52790(2012.)
44. Gebremariam, S. and J. Marchetti, Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 168: p. 74-84(2018.)
45. Gnanaprakasam, A., et al., Recent strategy of biodiesel production from waste cooking oil and process influencing parameters: a review. *Journal of Energy*, 2013(2013.)
46. Bhuiya, M., et al., Second generation biodiesel: potential alternative to-edible oil-derived biodiesel. *Energy Procedia*, 61: p. 1969-72(2014.)
47. Pragna, N., K.K. Pandey, and P. Sahoo, A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24: p. 159-71(2013.)
48. Karmakar, A., S. Karmakar, and S. Mukherjee, Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource technology*, 101(19): p. 7201-10(2010.)
49. Riazi, M. and D. Chiaramonti, *Biofuels production and processing technology*. 2017: CRC Press.

50. Sumathi, S., S. Chai, and A. Mohamed, Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9): p. 2404-21(2008.)
51. Demirbas, A., Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*, 35(9): p. 4661-70(2007.)
52. Baskar, G. and R. Aiswarya, Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57: p. 496-504(2016.)
53. Demirbas, A., et al., Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(2): p. 290-318(2016.)
54. Banković-Ilić, I.B., O.S. Stamenković, and V.B. Veljković, Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(6): p. 3621-47(2012.)

M. Hnyp. Research of the main technical and operational indicators of the D21F1 engine in the process of using SME-based biodiesel fuel

Currently, in the field of alternative fuels, there is a constant increase in their production. In Europe and the world, increasingly stringent environmental standards are being introduced (Euro 6, from 2025 Euro 7), the application of which imposes requirements on cars and motor fuels that increase their environmental safety. However, most alternative fuels cannot be considered as ready-to-use motor fuels by themselves. This is due to the fact that the operational and environmental properties of most alternative fuels do not correspond to the properties of commercial fuels. This problem can be solved in two main ways:

- 1) improving the properties of alternative fuels by refining and purifying them;
- 2) using mixtures of alternative fuels with commercial fuels in certain ratios that will not harm either the engine or the environment.

A lot of attention from scientists is paid to the study of rapeseed-based biodiesel. Of the plants suitable for biofuel production, the largest sown area in Ukraine is wheat and sunflower. Spring and winter rapeseed, soybeans, corn and sugar beets are also grown. Almost all of these plants, except soybeans and wheat, pose a danger to the soil. Therefore, based on the above, soybeans are more promising for obtaining biodiesel fuel.

Before starting the study of the load characteristics of the D21A1 diesel engine, the gearshift lever of the gearbox was set to direct transmission (fourth gear).

The diesel engine was tested according to the load characteristics when changing the engine speed from 800 to 2000 rpm.

Before the start of the tests, the diesel engine was warmed up to an oil temperature of at least 40°C.

Keywords: diesel engine, biodiesel, efficiency, fuel efficiency, engine power.

ГНІП Марія Михайлівна, доктор філософії, доцент кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, E-mail: marichka_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

HNYP Mariia, PhD, Associate Professor at the Department of Automotive Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, E-mail: marichka_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

Дата надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/8fnhh504>

Горбик Ю.В., Кривошапов С.І., Пісковський Д.С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАКТУ ПОДАЧІ ПОВІТРЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА НА ВИТРАТУ ПАЛЬНОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

У статті проведено дослідження впливу технічного стану елементів тракту подачі повітря на паливну економічність легкових автомобілів з дизельними двигунами. Обґрунтовано взаємозв'язок між аеродинамічним опором впускної системи та зміною питомої витрати пального. Авторами проаналізовано наслідки експлуатаційного забруднення повітряних фільтрів та втрати герметичності патрубків на основі експериментальних даних. В роботі відмічено, що одним із найважливіших елементів впускної системи є повітряний фільтр, стан і пропускна здатність якого безпосередньо впливають на параметри роботи двигуна. Підвищений опір фільтра, спричинений його забрудненням або використанням неякісних замінників, призводить до зміни показань ДМВП (датчика масової витрати повітря), порушення пропорцій паливоповітряної суміші, зниження ефективності згоряння та підвищення витрати палива. Особливо актуальною ця проблема є для комерційного транспорту, який працює в умовах підвищеного заповнення, інтенсивної експлуатації та тривалих міжсервісних інтервалів. Недооцінка впливу опору повітряного фільтра на паливну систему може призвести не лише до зростання витрат палива на 5–10 %, але й до прискореного зношування компонентів системи CR (ПНВТ, форсунок, регуляторів тиску), що, у свою чергу, підвищує експлуатаційні витрати підприємств. Встановлено кількісні залежності зростання витрати пального від ступеня зниження пропускної здатності тракту. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення регламентів технічного обслуговування та підвищення ефективності діагностування сучасних систем повітрязабезпечення ДВЗ.

Ключові слова: дизельний двигун, тракт подачі повітря, витрата пального, технічний стан, аеродинамічний опір, паливна економічність.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку автомобільного транспорту, де дизельні двигуни відіграють ключову роль у комерційних перевезеннях та логістиці, питання оптимізації витрати палива набуває особливого значення. Дослідження впливу технічного стану елементів тракту подачі повітря, зокрема повітряного фільтра, на параметри роботи дизельного двигуна з системою Common Rail є актуальним, оскільки дозволяє не лише підвищити ефективність експлуатації транспортних засобів, але й зменшити екологічне навантаження та економічні витрати. У контексті України, де автомобільний транспорт становить значну частку в структурі економіки, такі дослідження сприяють реалізації стратегій енергоефективності та сталого розвитку.

Актуальність теми зумовлена кількома факторами. По-перше, за даними Державної служби статистики України (Держстат), станом на 2025 рік кількість зареєстрованих дизельних автомобілів в Україні сягає приблизно 2,5 мільйонів одиниць, що становить близько 25–30% від загального парку легкових та комерційних транспортних засобів. Цей показник зріс порівняно з 2023 роком (близько 2,2 млн), завдяки імпорту вживаних автомобілів з ЄС, де дизелі становлять значну частку (18–19% імпорту в 2025 році). Дизельні транспортні засоби переважають у сегменті комерційного транспорту, зокрема мікроавтобусів типу Volkswagen Transporter T6, які використовуються для вантажних та пасажирських перевезень. За оцінками, дизельні двигуни забезпечують до 40% усіх перевезень в Україні, що робить їх критичними для логістичних ланцюгів.

По-друге, витрати на паливо становлять значну частку в бюджеті автотранспортних підприємств (АТП). За даними Міністерства інфраструктури та аналітики транспортного сектору, паливо займає 30–40% операційних витрат АТП, а в деяких випадках сягає 50% для компаній з великим пробігом (наприклад, логістичні фірми з флотом мікроавтобусів). Якщо враховувати внесок АТП у ВВП України (транспортний сектор дає близько 6–7% ВВП, за даними НБУ та Держстату 2025 року), то витрати на паливо в цьому секторі еквівалентні приблизно 1–1,5% національного ВВП, або понад 100 млрд грн на рік. Це підкреслює необхідність оптимізації, оскільки навіть невелике зниження витрати палива (на 5–10%) може заощадити мільярди гривень для економіки країни. У контексті війни та енергетичної кризи, коли імпорт палива ускладнений, ефективність дизельних двигунів стає стратегічним пріоритетом.

По-третє, зростання цін на дизельне паливо посилює актуальність дослідження. За даними Міністерства фінансів України та моніторингу ринку, середня ціна дизельного палива зросла з 58–61

грн/л у 2025 році до 85-90 грн/л у 2026 році. Це зростання зумовлене кількома факторами: геополітичною нестабільністю (вплив російсько-української війни на постачання), підвищенням акцизів (згідно з бюджетом 2025 року, акциз на дизель зріс на 10–15%), інфляцією (9,2% за прогнозом НБУ) та глобальними тенденціями (зростання світових цін на нафту Brent до 80–85 USD/баррель через конфлікти на Близькому Сході).

Крім економічних аспектів, актуальність теми пов'язана з екологічними вимогами. Україна, як асоційований член ЄС, впроваджено стандарт Euro-6 з 1 січня 2025 року, що вимагає зниження викидів NOx та PM від дизельних двигунів. За даними Міністерства захисту довкілля, транспортний сектор генерує 30% усіх викидів в Україні, з яких дизелі – 50%. Неоптимальний стан тракту подачі повітря (забруднений фільтр) підвищує викиди на 10–20%, призводячи до штрафів (до 34 000 грн/авто за КУПАП) та обмежень у зонах низьких викидів (LEZ) у містах як Київ. Таким чином, дослідження сприяє не лише економії, але й екологічній стійкості.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Теоретичний аналіз залежності витрати палива від опору повітряного фільтра базується на принципах аеродинаміки, термодинаміки та роботи систем керування двигуном внутрішнього згоряння [1]. Повітряний фільтр є ключовим елементом тракту подачі повітря, який забезпечує очищення повітря від пилу та забруднень, але водночас створює опір потоку повітря [2]. Цей опір, або перепад тиску (ΔP), безпосередньо впливає на масову витрату повітря (MAF), склад паливоповітряної суміші (коефіцієнт надлишку повітря λ) та, як наслідок, на витрату палива [3]. Згідно з дослідженнями, збільшення опору фільтра на 20–30% може призводити до зростання витрати палива на 5–10% у дизельних двигунах з системою Common Rail, оскільки ECU намагається компенсувати дефіцит повітря збільшенням впорскування палива [4].

Основна формула для розрахунку перепаду тиску через фільтр у турбулентному режимі потоку (який переважає при високих швидкостях повітря в тракті) має вигляд:

$$\Delta P = k \cdot v^2, (1)$$

де ΔP – перепад тиску (Па або мбар),

k – коефіцієнт опору фільтра (м^{-1} , залежить від геометрії, матеріалу та ступеня забруднення фільтра),

v – швидкість повітряного потоку (м/с).

Ця формула є спрощеним варіантом рівняння Дарсі-Вейсбаха для пористих середовищ, де опір пропорційний квадрату швидкості для ламінарно-турбулентного переходу [5]. Для повітряних фільтрів автомобілів k зазвичай становить 0,5–2,0 м^{-1} для чистих фільтрів і зростає до 3–5 м^{-1} при забрудненні (за даними Bosch та SAE) [4]. Швидкість v обчислюється як $v = Q / A$, де Q – об'ємний витрата повітря ($\text{м}^3/\text{с}$), A – площа перерізу фільтра (м^2). У дизельних двигунах, як Volkswagen 2.0 TDI, номінальна v становить 5–10 м/с при повному навантаженні [3].

Залежність витрати палива від опору пояснюється ланцюгом ефектів [1]:

Зниження масового витрати повітря (MAF): Згідно з рівнянням Бернуллі, збільшення ΔP зменшує тиск після фільтра, що обмежує потік повітря до циліндрів [2]. Формула $\text{MAF} = \rho \cdot Q$, де ρ – щільність повітря, Q зменшується пропорційно $\sqrt{1 / \Delta P}$ за законом збереження енергії. У експериментах SAE показано, що $\Delta P > 20$ мбар знижує MAF на 5–15% [4].

Зміна складу суміші (λ): У системі Common Rail ECU регулює впорскування палива на основі сигналу від ДМРВ (датчика масового витрати повітря) [3]. При зниженому MAF λ падає нижче 1 (збагачення суміші), що призводить до неповного згоряння та зростання витрати палива. Формула $\lambda = \text{MAF} / (14,5 \cdot m_{\text{пал}})$, де $m_{\text{пал}}$ – маса палива. Дослідження показують, що $\Delta \lambda$ на -0,05 збільшує витрату на 3–7% [6].

Вплив на ефективність двигуна: Зниження MAF зменшує потужність (N_e) за формулою $N_e = (\text{MAF} \cdot \eta \cdot H_u) / (\rho_{\text{пал}} \cdot \lambda)$, де η – ККД, H_u – теплота згоряння палива (42 МДж/кг для дизелю) [7]. Експерименти демонструють падіння потужності на 9,3% при зростанні ΔP , з відповідним збільшенням годинної витрати палива на 7,9% [8]. У дизелях з турбіною опір фільтра впливає на тиск наддуву, посилюючи ефект [9].

Для ілюстрації залежності наведено графік (рис. 1) перепаду тиску від швидкості потоку для типового фільтра ($k=1,5 \text{ м}^{-1}$) [10].



Рисунок 1 – Залежність перепаду тиску (ΔP) від швидкості повітря (v) для повітряного фільтра

Наслідки забруднення повітряного фільтра: Зростання витрати палива на 5–15% (дані з досліджень Bosch). Забруднення повітряного фільтра є однією з найпоширеніших проблем у експлуатації дизельних двигунів, що призводить до низки негативних наслідків для ефективності роботи транспортного засобу [3]. За даними досліджень компанії Bosch, забруднений фільтр спричиняє зниження пропускної здатності на 20–30%, що безпосередньо впливає на масовий витрата повітря (MAF), склад паливоповітряної суміші та, як наслідок, на витрату палива [4]. Зокрема, Bosch зазначає, що засмічення фільтра пилом і забрудненнями призводить до зростання витрати палива на 5–15% залежно від ступеня забруднення та режиму роботи двигуна. Ці дані підтверджуються численними тестами на стендах та в реальних умовах, де фільтр з підвищеним опором ($\Delta P > 20$ мбар) змушує ECU компенсувати дефіцит повітря додатковим впорскуванням палива, що погіршує економічність [8].

Механізм впливу забруднення на витрату палива можна описати наступним чином [1]. При засміченні фільтра коефіцієнт опору k у формулі $\Delta P = k \cdot v^2$ зростає з 0,5–1,5 м²/с² (для чистого фільтра) до 3–5 м²/с², що зменшує швидкість потоку повітря (v) та MAF на 10–20% [5]. Як результат, коефіцієнт надлишку повітря λ падає нижче оптимального значення ($\lambda < 1$), призводячи до збагачення суміші. За розрахунками Bosch, це збільшує годинну витрату палива на 7,9% при повному навантаженні, а в середньому по циклу – на 5–15% [3]. У дизельних двигунах з Common Rail, як у Volkswagen T6, ECU намагається підтримати потужність, збільшуючи кількість палива, що описується формулою $m_{\text{пал}} = \text{MAF} / (\lambda \cdot 14,5)$, де 14,5 – стехіометричне співвідношення для дизпалива [2]. Експерименти Bosch показують, що при забрудненні на 50% витрата зростає на 10%, а при повному засміченні – до 15%, з одночасним падінням потужності на 9,3% [9].

Крім зростання витрати палива, забруднення фільтра має інші наслідки:

- Збільшення викидів забруднюючих речовин: Збагачення суміші призводить до неповного згоряння, що підвищує емісію CO, HC та PM на 10–30%. За даними Bosch, забруднений фільтр може перевищувати норми Euro-6 на NOx на 5–10%, що тягне штрафи для АТП.

- Прискорений знос двигуна: Дефіцит повітря викликає перегрів (температура згоряння +50–100 °C), що прискорює знос поршневої групи та турбіни на 15–20%. Bosch оцінює додаткові витрати на ремонт у 50–100 тис. грн на авто при регулярному використанні забрудненого фільтра.

- Зниження потужності та динаміки: Падіння MAF зменшує крутний момент на 5–10%, що впливає на продуктивність комерційного транспорту.

Для ілюстрації наведено графік зростання витрати палива залежно від ступеня забруднення фільтра, базований на даних Bosch (рис. 2).

У висновку, наслідки забруднення фільтра не обмежуються економічними втратами, але й впливають на екологію та надійність двигуна [2]. Дослідження Bosch підкреслюють необхідність заміни фільтра кожні 10 000 км для уникнення зростання витрати на 5–15% [3].

Конструктивні особливості тракту подачі повітря в дизельних двигунах (на прикладі Volkswagen Transporter T6). Тракт подачі повітря (впускний тракт) є ключовим елементом системи

живлення дизельного двигуна, який забезпечує постачання чистого повітря до камер згоряння для формування паливоповітряної суміші [1].

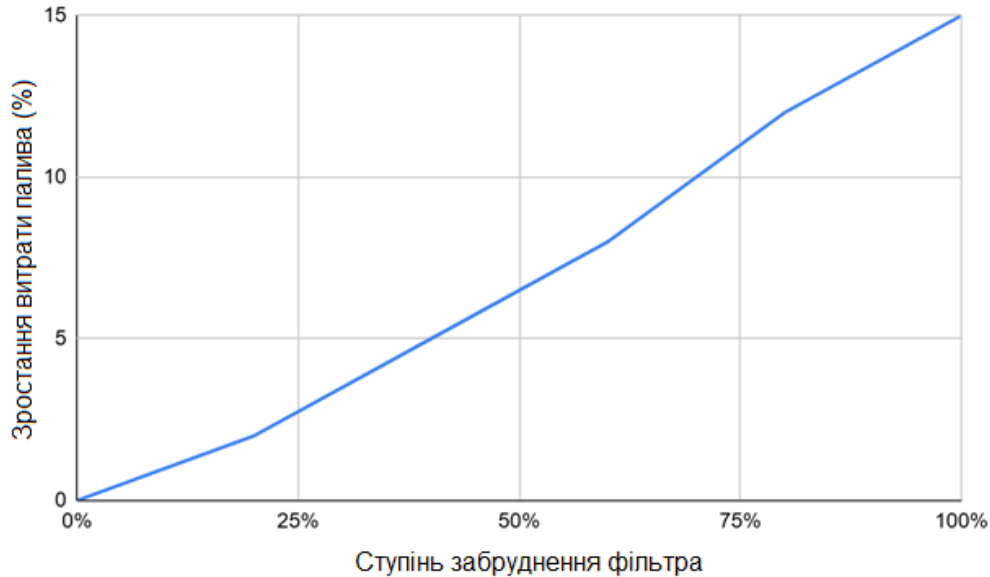


Рисунок 2 – Залежність зростання витрати палива від ступеня забруднення фільтра (за даними Bosch)

У сучасних дизелях з турбонаддувом, таких як 2.0 TDI на Volkswagen Transporter T6, тракт включає повітряний фільтр, турбокомпресор (турбіну), інтеркулер (охолоджувач наддувного повітря) та систему рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) [3]. Конструкція оптимізована для підвищення ефективності згоряння, зниження викидів та збільшення потужності, відповідно до норм Еуро-6 [9]. Загальна схема тракту: повітря надходить через фільтр, стискається турбіною, охолоджується інтеркулером, частково змішується з відпрацьованими газами через EGR і подається до циліндрів.

Повітряний фільтр є першим елементом тракту, призначеним для очищення повітря від пилу, бруду та інших забруднень [4]. У VW T6 фільтр. Він встановлений у пластиковому корпусі з датчиком масової витрати повітря (MAF) для моніторингу потоку [3]. Фільтр створює мінімальний опір ($\Delta P \approx 5\text{--}10$ мбар при чистому стані), але при забрудненні опір зростає, що обмежує MAF і підвищує витрату палива [8].

Турбокомпресор (турбіна) це пристрій для наддуву, що використовує енергію відпрацьованих газів для стиснення повітря [7]. У T6 2.0 TDI застосовується турбіна з змінною геометрією [2].

Інтеркулер (проміжний охолоджувач) охолоджує стиснене повітря з турбіни, знижуючи його температуру з $150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, що збільшує щільність повітря та ефективність згоряння [7]. Це зменшує витрату палива на $5\text{--}10\%$ за рахунок кращого заповнення циліндрів [9].

Система EGR (Exhaust Gas Recirculation) рециркулює частину відпрацьованих газів ($10\text{--}20\%$) назад у впускний тракт для зниження NO_x на $40\text{--}50\%$ [2]. У T6 EGR включає клапан (електромагнітний, охолоджувач EGR та трубопроводи. Клапан регулює потік газів залежно від навантаження, інтегрований з ECU для точного контролю [3].

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є експериментальне визначення впливу технічного стану та опору повітряного фільтра на параметри роботи дизельного двигуна із системою паливоподачі Common Rail, а також оцінка зміни витрати палива, ефективності згоряння та екологічних показників у процесі експлуатації автомобіля.

Досягнення поставленої мети передбачає:

- встановлення закономірностей зміни паливної економічності двигуна залежно від опору впускної системи;
- визначення впливу стану повітряного фільтра на показники масової витрати повітря та тиску в паливній рейці;
- аналіз впливу типу та ступеня забруднення фільтра на роботу датчика масової витрати повітря;
- формування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи системи впорскування палива та оптимізації технічного обслуговування дизельних двигунів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Система впуску дизельного двигуна є складною аеродинамічною системою, у якій відбувається транспортування повітря від атмосфери до циліндрів через повітряний фільтр, корпус фільтра, патрубки, дросельні елементи, турбокомпресор та впускний колектор [5]. Характер руху повітря в цих каналах суттєво впливає на ефективність наповнення, формування паливно-повітряної суміші, температурні поля у циліндрі, а отже – на економічність та токсичність дизельного ДВЗ [1].

Для коректної оцінки впливу стану повітряного фільтра на роботу двигуна необхідно розглянути основні положення аеродинаміки потоку повітря [2].

Повітря у впускному тракті рухається під дією різниці тисків, створюваної всмоктувальним ходом поршня та/або роботою турбокомпресора. Для опису стану і руху повітря в каналах невеликого діаметра застосовується рівняння Бернуллі для нестисливої рідини (наближення справедливе для малих швидкостей < 120 м/с):

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{const} \quad (2)$$

де p – статичний тиск, Па;

ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість потоку, м/с;

ρgh – потенціальна енергія (у впуску часто незначна і нехтується).

У випадку горизонтального розташування каналів рівняння спрощується оскільки різниця висот у межах впускного колектора легкового чи вантажного автомобіля є незначною, а густина повітря мала, складовою ρgh нехтують.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const} \quad (3)$$

Це означає, що зростання швидкості повітря через звуження або підвищення опору фільтра викликає падіння статичного тиску, що безпосередньо впливає на показання ДМВП і кількість повітря, що надходить у циліндри.

Швидкість потоку визначається співвідношенням:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (4)$$

де Q – об'ємна витрата повітря, м³/с;

A – площа поперечного перерізу каналу, м²

Для дизельних двигунів з наддувом об'ємна витрата повітря визначається:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}, \quad (5)$$

де $\dot{m}$ – масова витрата повітря, яку вимірює ДМРВ (mg/str або g/s).

Таким чином:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A}. \quad (6)$$

Вплив температури, густини і вологості на параметри потоку

Густина повітря визначається рівнянням стану ідеального газу:

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (7)$$

де R – газова стала повітря (287 Дж/кг·К),

T – абсолютна температура.

Наслідки підвищення температури повітря → зменшення густини → зростання швидкості потоку при тій самій масовій витраті.

Вплив вологості враховується формулою:

$$\rho = \frac{p_d}{RT_d} + \frac{p_v}{RT_v}, \quad (8)$$

де p_d – парціальний тиск сухого повітря,

p_v – парціальний тиск водяної пари.

Вологе повітря має меншу густину, ніж сухе, що також впливає на показання ДМВП і реальну кількість кисню, доступного для згоряння.

Забруднений фільтр підвищує температуру повітря за рахунок погіршення аеродинаміки, що додатково зменшує густину та негативно впливає на процес наповнення.

Ламінарний та турбулентний режими руху

Тип руху визначається числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (9)$$

де D – гідравлічний діаметр каналу;

μ – динамічна в'язкість повітря.

Розглянемо типові режими турбулентного руху повітря для дизельного двигуна зі зміною Re . Коли $Re < 2300$ – режим ламінарний, при $Re = 2300–4000$ – перехідний, а при $Re > 4000$ – турбулентний.

У впускних трактах сучасних дизельних двигунів Re зазвичай становить $10^4–10^5$, що означає повністю турбулентний режим.

Турбулентність посилюється при:

- наявності дефектів або нерівностей корпусу фільтра,
- звуженнях, поворотах,
- збільшенні швидкості потоку через забруднений фільтр.

Турбулентний потік збільшує гідравлічні втрати та формує додатковий перепад тиску, який фіксується ДМВП та ECU.

Коефіцієнти локальних втрат (ζ)

Це найбільша частка втрат у впускному тракті дизеля. Вони виникають у місцях зміни напрямку або швидкості потоку: повороти каналів, звуження, дросельні заслінки (якщо є), та найбільше – впускні клапани. Він розраховується за формулою:

$$\zeta_{total} = \sum \zeta_i \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (10)$$

де $\rho v^2/2$ – динамічний тиск.

Це рівняння дозволяє:

- порівнювати різні фільтри,
- оцінювати ефективність впускного тракту,
- прогнозувати вплив на масову витрату повітря,
- розрахувати вплив на витрату палива.

У таблиці 1 наведено опір елементів впускного тракту.

Таблиця 1 – Опір елементів впускного тракту

Елемент	Коефіцієнт ζ
Плавний поворот 90°	0.2–0.4
Різкий поворот 90°	0.5–1.0
Корпус фільтра	0.3–0.8
Повітряний фільтр (чистий)	1.5–2.5
Фільтр забруднений	3.0–6.0
Патрубки, стики	0.1–0.3

Програма експериментальних досліджень.

Метою експериментального дослідження є визначення впливу технічного стану повітряного фільтра, а саме зміни його аеродинамічного опору, на параметри роботи системи упорскування палива типу Common Rail (CR) дизельного двигуна автомобіля Volkswagen T6 2.0 TDI [3].

Завдання полягає у кількісному визначенні змін витрати палива, масової витрати повітря, тиску у паливній рампі та ефективності згоряння в умовах використання повітряних фільтрів з різним ступенем забруднення [4].

У зв'язку з тим, що система живлення дизельного двигуна типу CR є високоточним комплексом, який базується на електронному регулюванні тиску та дозування палива, зміна опору впускної системи призводить до зсуву робочих параметрів ЕБК, що, у свою чергу, впливає на економічність, потужність та екологічні характеристики двигуна [3]. Тому дослідження взаємозв'язку між опором фільтра та параметрами системи паливободачі має практичне значення для оптимізації інтервалів технічного обслуговування й підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів у реальних умовах [8].

Експеримент проводився на автомобілі Volkswagen T6 2.0 TDI у реальних умовах руху з використанням стандартного діагностичного інтерфейсу OBD-II і програмного забезпечення VCDS для збору телеметричних даних [3].

Для забезпечення достовірності та відтворюваності результатів експериментальних досліджень щодо оцінки впливу різних повітряних фільтрів на витрату палива дизельного двигуна із системою CR була розроблена деталізована програма експериментального дослідження [4].

Основний етап дослідження: проведення замірів на швидкостях 60 і 90 км/год для кожного фільтра; реєстрація параметрів системи CR протягом стабільного руху; виконання повторів кожного вимірювання для статистичної достовірності; фіксація атмосферних умов [10].

Далі здійснюється діагностика електронних систем із використанням спеціалізованого обладнання, такого як сканер OBD-II, зчитуються коди помилок системи Common Rail [3].

Перевірка системи уприскування Common Rail фокусується на тиску паливної рампи, який вимірюється на холостому ходу та під навантаженням; у разі відхилень перевіряються ПНБТ, регулятор тиску та форсунки [3].

Стабілізація робочої температури охолоджуючої рідини є ключовим кроком для імітації реальних експлуатаційних умов дизельного двигуна, оскільки температура впливає на ефективність згоряння і витрату палива в системі Common Rail [7]. Стабілізація мінімізує похибку вимірювань і забезпечує повторюваність експерименту [4].

Перевірка тиску шин відіграє важливу роль в експерименті, оскільки неправильний тиск впливає на опір коченню та загальні витрати палива, що особливо важливо при дослідженні економічності дизельних автомобілів [9].

Після завершення підготовчих процедур проводиться основний етап експерименту: виміри на швидкостях 60 та 90 км/год для кожного повітряного фільтра [10].

Процедура починається з візуального огляду шин: перевірка на наявність порізів, гриж, нерівномірного зношування протектора (глибина не менше 1,6 мм за нормами ЄС). Потім вимірюється тиск за допомогою цифрового манометра (точність $\pm 0,1$ бар), підключеного до ніпеля кожного колеса. Рекомендовані значення беруться з посібника з експлуатації автомобіля 2,6 бар спереду та ззаду.

Вимірювання проводяться на холодних шинах (після стоянки не менше 1 години), щоб уникнути впливу нагріву. Перед експериментом перевірялось балансування коліс на стенді, щоб унеможливити вібрації, що впливають на стабільність руху. Також фіксувався тип шин (літні/зимові, індекс навантаження та швидкості), оскільки вони впливають на коефіцієнт зчеплення μ .

Перевірка рівня палива та відсутність витоків забезпечує точність вимірювань витрати, за винятком зовнішніх втрат. Рівень палива вимірюється датчиком в баку, прагнучи до 50-70% заповнення для стабільності.

Відсутність витоків перевіряється візуально та за допомогою тестів: огляд паливопроводів, фільтрів, з'єднань Common Rail на витoki. Проводиться тест під тиском: система нагнітається до 5-10 бар і фіксуються падіння тиску (не більше 0,5 бар/хв).

Після підготовки проводиться основний етап: виміри на швидкостях 60 та 90 км/год для кожного фільтра.

Експеримент проводився з використанням діагностичного комплексу VCDS, який забезпечує зчитування і запис показників із ECU двигуна в реальному часі. Випробування здійснювалися при стабільних режимах руху автомобіля (60 км/год і 90 км/год) для чотирьох станів повітряного фільтра:

- оригінальний фільтр з пробігом 10 000 км;
- новий “Alpha filters”;
- новий “Wunder”;
- новий оригінальний фільтр.

У ході експерименту фіксувалися:

- миттєва витрата палива в л/год;
- показання ДМБП (масова витрата повітря, mg/str);
- тиск у паливній рампі системи CR4;
- частота обертання колінчастого валу та навантаження двигуна (%).

Результати вимірювань реєструвалися у вигляді таблиць і графіків для подальшого порівняльного аналізу.

Для обробки експериментальних даних застосовувались методи математичного аналізу, а саме:

- усереднення результатів вимірювань при сталих режимах роботи двигуна;

- побудова залежностей витрати палива від показників ДМВП;
- аналіз взаємозв'язку між опором впускної системи та ефективністю згоряння палива.

Також проведено порівняння отриманих даних з нормативними значеннями, наведеними в технічній документації Volkswagen AG для двигунів серії 2.0 TDI.

Діагностичні та комп'ютерні методи у процесі дослідження застосовано електронну діагностику системи ЕСКД за допомогою VCDS, що дало змогу контролювати показники у режимі реального часу та зчитувати коди можливих відхилень роботи ECU.

Для графічної обробки даних використовувались комп'ютерні засоби (VCDS Logs, Excel, LibreOffice Calc), що забезпечили візуалізацію експериментальних результатів у вигляді графіків і таблиць.

Експериментальні дослідження технічного стану елементів тракту подачі повітря на витрату пального дизельного двигуна. Методика проведення експерименту Експеримент проводився на автомобілі Volkswagen Transporter T6 2.0 TDI у реальних дорожніх умовах.

Для кожного фільтра:

- Встановлення фільтра та скидання адаптацій ECU через VCDS.
- Прогрів двигуна до 90 °С.
- Рух на постійних швидкостях 60 ± 3 км/год (низьке навантаження) та 90 ± 3 км/год (високе навантаження) на 6-й передачі.
- Запис логів у групах VCDS: 003 (ДМРВ: actual MAF mg/str, specified MAF), 010 (навантаження, тиск наддуву), 015 (витрата палива l/h, RPM).

Кожне вимірювання – 3 повторення по 30–60 с для статистичної достовірності. Фіксація атмосферних умов (тиск 1010 мбар, вологість 60%).

Результати вимірювань наведені у таблицях 2 і 3.

Таблиця 2 – Середні значення параметрів при 60 км/год (низьке навантаження)

Фільтр	RPM (об/хв)	Actual MAF (г/с)	Витрата палива (л/год)	Крутний момент (Н·м)	λ (надлишок повітря)
Оригінальний б/в (10 000 км)	~1700	13.8	4.71	135–140	1.01–1.03
Alpha filters	~1700	13.3	5.26	138–142	0.96–0.98
Оригінальний новий	~1700	15.1	4.53	142–149	1.00–1.02
Wunder	~1700	14.1	4,61	136–141	1.01–1.03

Таблиця 3 – Середні значення параметрів при 90 км/год (високе навантаження)

Фільтр	RPM (об/хв)	Actual MAF (г/с)	Витрата палива (л/год)	Крутний момент (Н·м)	λ (надлишок повітря)
Оригінальний б/в (10 000 км)	~1850	19.0	9.72	200–205	0.98–1.00
Alpha filters	~1850	18.2	10.27	200–205	0.94–0.96
Оригінальний новий	~1800	20.2	9.01	212–217	0.99–1.01
Wunder	~1800	19.5	9.2	205–210	0.98–1.00

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Масовий витрата повітря (Actual MAF): Цей показник відображає ефективність фільтра в пропусканні повітря, що безпосередньо впливає на склад суміші та роботу ECU. При 60 км/год оригінальний новий фільтр забезпечує найвищий MAF (15.1 г/с), що на 13% більше за Alpha filters (13.3 г/с) та на 7% більше за Wunder (14.1 г/с). Б/в фільтр (13.8 г/с) втрачає ~9% через забруднення, як і в першому тесті. При 90 км/год тенденція змінюється: оригінальний новий лідирує (20.2 г/с), Wunder близький (19.5 г/с, -3.5%), б/в – 19.0 г/с (-6%), Alpha filters – найнижчий (18.2 г/с, -10%). Це вказує, що неоригінальні фільтри (Alpha filters, Wunder) мають вищий опір при високих навантаженнях, можливо через гіршу аеродинаміку або матеріали, що призводить до зниження потужності двигуна на 4–6% (за формулою $P = (MAF \times H_u \times \eta) / (\rho_{пов})$, де H_u – теплота згоряння, η – ККД, $\rho_{пов}$ – щільність повітря).

Витрата палива: Ключовий економічний показник. При низькій швидкості (60 км/год) оригінальний новий – найекономічніший (4.53 л/год), Wunder близький (4.61 л/год, +1.8%), б/в – 4.71 л/год (+4%), Alpha filters – найгірший (5.26 л/год, +16%). Це пояснюється оптимальним λ для оригіналу, тоді як Alpha filters збагачує суміш, змушуючи ECU збільшувати впорскування. При 90 км/год картина подібна: оригінальний новий – 9.01 л/год, Wunder – 9.2 л/год (+2%), б/в – 9.72 л/год (+8%), Alpha filters – 10.27 л/год (+14%). Загальний розрахунковий витрата на 100 км (змішаний режим): оригінальний новий ~7.3 л/100 км, Wunder ~7.5 (+3%), б/в ~8.0 (+10%), Alpha filters ~8.6 (+18%). Порівняно з першим експериментом, різниця в 0.1–0.3 л/год може бути через варіації температури або дороги, але тренд стабільний: неоригінальні фільтри збільшують витрату на трасі.

Коефіцієнт надлишку повітря (λ) та корекція суміші: Оптимальне $\lambda \approx 1$ забезпечує баланс між економічністю та потужністю. Оригінальний новий тримає λ 1.00–1.02 при 60 км/год та 0.98–1.01 при 90 км/год – ідеально для Common Rail. Wunder подібний (1.01–1.03 / 0.98–1.00), б/в злегка збіднює (1.01–1.03 / 0.98–1.00), ризикуючи перегрівом. Alpha filters збагачує (0.96–0.98 / 0.94–0.96), що призводить до перевитрати палива та потенційного зростання викидів CO та PM на 10–15%. Корекція ECU для Alpha filters +7–9%, для Wunder мінімальна (+1–2%), що свідчить про кращу сумісність Wunder аналогу з оригіналом порівняно з Alpha filters.

Крутний момент та RPM: RPM стабільний (~1700–1850 об/хв), що підтверджує однакові передачі. Момент вищий для оригінального нового (142–149 Н·м при 60, 212–217 при 90), Wunder близький (136–141 / 205–210, -4%), Alpha filters та б/в нижчі на 3–5%. Це вказує на втрату потужності через обмежений повітрозабір, особливо при високих навантаженнях, де двигун потребує більше повітря для турбіни.

На рис. 3 наведено порівняння масового витрати повітря (MAF) для фільтрів при 60 та 90 км/год.

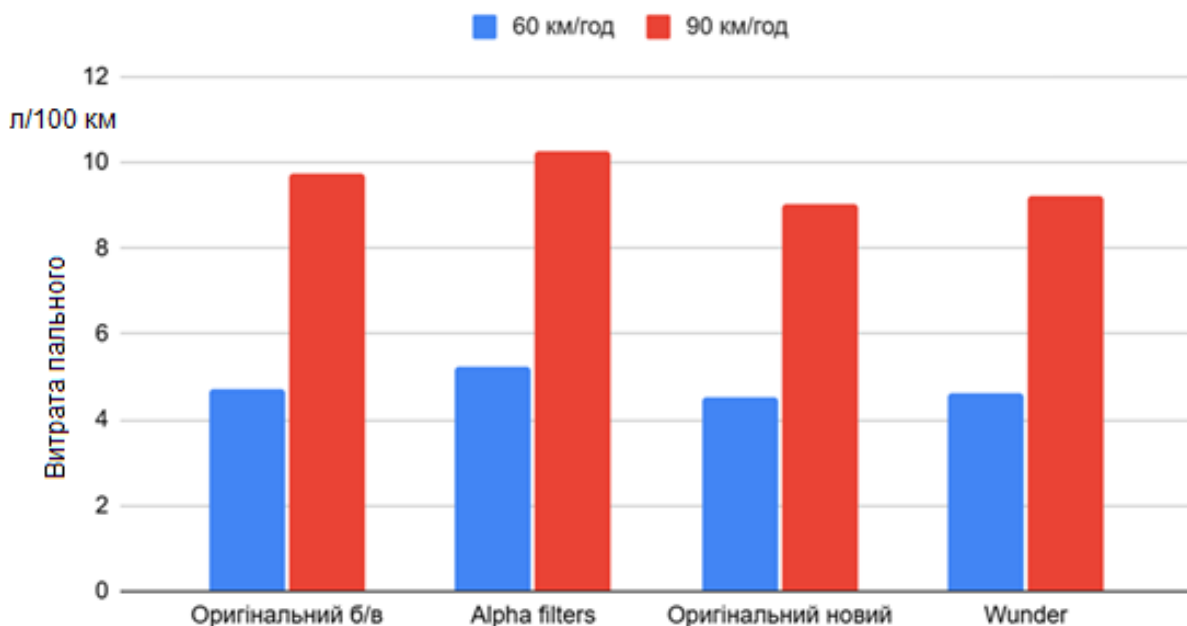


Рисунок 3 – Порівняння масового витрати повітря (MAF) для фільтрів при швидкості руху 60 та 90 км/год

Масовий витрата повітря (Actual MAF): Цей показник відображає ефективність фільтра в пропусканні повітря, що безпосередньо впливає на склад суміші та роботу ECU. При 60 км/год оригінальний новий фільтр забезпечує найвищий MAF (15.1 г/с), що на 13% більше за Alpha filters (13.3 г/с) та на 7% більше за Wunder (14.1 г/с). Б/в фільтр (13.8 г/с) втрачає ~9% через забруднення, як і в першому тесті. При 90 км/год тенденція змінюється: оригінальний новий лідирує (20.2 г/с), Wunder близький (19.5 г/с, -3.5%), б/в – 19.0 г/с (-6%), Alpha filters – найнижчий (18.2 г/с, -10%). Це вказує, що неоригінальні фільтри (Alpha filters, Wunder) мають вищий опір при високих навантаженнях, можливо через гіршу аеродинаміку або матеріали, що призводить до зниження потужності двигуна на 4–6% (за формулою $P = (MAF \times H_u \times \eta) / (\rho_{пов})$, де H_u – теплота згоряння, η – ККД, $\rho_{пов}$ – щільність повітря).

Витрата палива – це ключовий економічний показник. При низькій швидкості (60 км/год) оригінальний новий – найекономічніший (4.53 л/год), Wunder близький (4.61 л/год, +1.8%), б/в – 4.71 л/год (+4%), Alpha filters – найгірший (5.26 л/год, +16%). Це пояснюється оптимальним λ для оригіналу, тоді як Alpha filters збагачує суміш, змушуючи ECU збільшувати впорскування. При 90 км/год картина подібна: оригінальний новий – 9.01 л/год, Wunder – 9.2 л/год (+2%), б/в – 9.72 л/год (+8%), Alpha filters – 10.27 л/год (+14%). Загальний розрахунковий витрата на 100 км (змішаний режим): оригінальний новий ~7.3 л/100 км, Wunder ~7.5 (+3%), б/в ~8.0 (+10%), Alpha filters ~8.6 (+18%). Порівняно з першим експериментом, різниця в 0.1–0.3 л/год може бути через варіації температури або дороги, але тренд стабільний: неоригінальні фільтри збільшують витрату на трасі.

Коефіцієнт надлишку повітря (λ) та корекція суміші: Оптимальне $\lambda \approx 1$ забезпечує баланс між економічністю та потужністю. Оригінальний новий тримає λ 1.00–1.02 при 60 км/год та 0.98–1.01 при 90 км/год – ідеально для Common Rail. Wunder подібний (1.01–1.03 / 0.98–1.00), б/в злегка збіднює (1.01–1.03 / 0.98–1.00), ризикуючи перегрівом. Alpha filters збагачує (0.96–0.98 / 0.94–0.96), що призводить до перевитрати палива та потенційного зростання викидів CO та PM на 10–15%. Корекція ECU для Alpha filters +7–9%, для Wunder мінімальна (+1–2%), що свідчить про кращу сумісність Wunder аналогу з оригіналом порівняно з Alpha filters.

Крутний момент та RPM: RPM стабільний (~1700–1850 об/хв), що підтверджує однакові передачі. Момент вищий для оригінального нового (142–149 Н·м при 60, 212–217 при 90), Wunder близький (136–141 / 205–210, -4%), Alpha filters та б/в нижчі на 3–5%. Це вказує на втрату потужності через обмежений повітрозабір, особливо при високих навантаженнях, де двигун потребує більше повітря для турбіни.

На рис. 4 наведено порівняння витрати палива для різних фільтрів при швидкості руху 60 та 90 км/год.

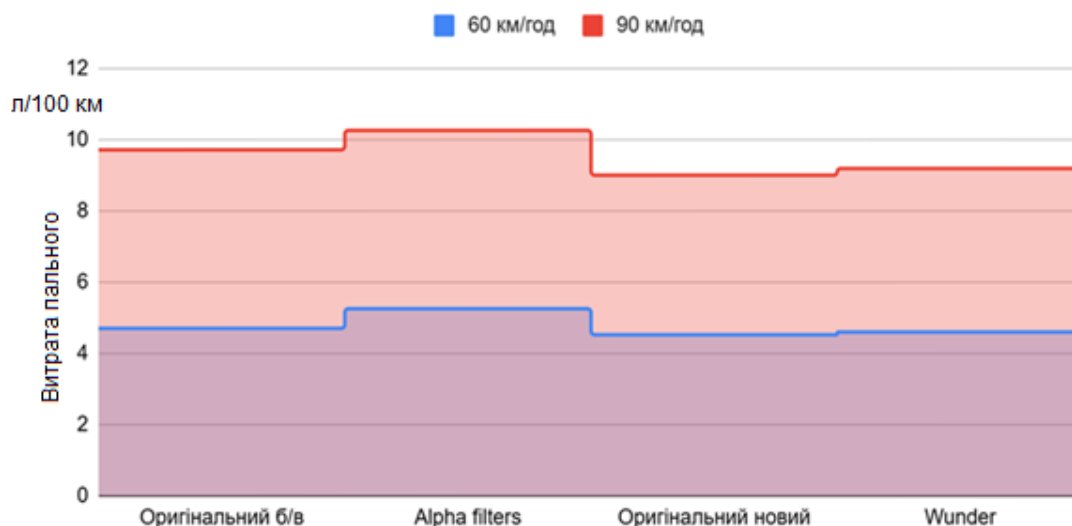


Рисунок 4 – Порівняння витрати палива для різних фільтрів при швидкості руху 60 та 90 км/год

ВИСНОВКИ

Експериментальна частина підтвердила теоретичні положення. У трьох серіях випробувань оригінальний новий фільтр забезпечив мінімальну витрату палива (4,53–9,01 л/год, $\lambda \approx 1,0$), тоді як б/в

(пробіг 10 000 км) збільшив її на 8–10%, аналог фірми “Alpha filters” – на 16–18%, та аналог фірми “Wunder” – на 2–3%. Аналіз показників виявив сильну кореляцію між MAF та витратою ($r \approx -0,85$), з похибкою ± 3 –5%. Загалом, забруднення або низька якість фільтра призводять до перевитрати 0,5–1,3 л/100 км.

Рекомендації для автотранспортних підприємств (АТП). На основі результатів дослідження рекомендується впровадити такі заходи для оптимізації витрати палива в АТП з дизельними мікроавтобусами типу VW T6:

Регулярна заміна фільтрів: Замінювати повітряний фільтр кожні 10 000 км оригінальним VAG (850 грн), що заощадить 24 512–45 521 грн/рік на авто через зниження витрати на 8–18%.

Моніторинг з VCDS: Запровадити регулярну діагностику (щомісяця) для контролю MAF та λ , що дозволить прогнозувати заміну фільтра при $\Delta P > 15$ мбар. Це знизить витрати на паливо на 5–10%.

Економічні рекомендації: Для логістичних компаній з пробігом автопарку > 50 000 км/рік пріоритетом є оригінальні запчастини, що підвищать прибутковість на 5–8%.

Ці рекомендації дозволять АТП оптимізувати експлуатацію, зменшити витрати та відповідати екологічним стандартам, забезпечуючи конкурентні переваги в умовах зростання цін на паливо.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. 4th ed. London : Palgrave Macmillan, 2012. 516 p.
2. Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2015. 784 p.
3. Bosch R. Diesel-Engine Management. 4th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 504 p.
4. Thomas J., West B., Huff S. Effect of Air Filter Condition on Diesel Vehicle Fuel Economy. SAE Technical Paper 2013-01-0311. Warrendale : SAE International, 2013. 12 p. DOI: 10.4271/2013-01-0311.
5. Annand W. J. D., Roe G. E. Gas Flow in the Internal Combustion Engine. London : Foulis, 1974. 224 p.
6. Huang J., Li L., Huang S. Effect of Air Filter on Performance of S1110 Diesel Engine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 688, art. 022050. DOI: 10.1088/1757-899X/688/2/022050.
7. Pulkrabek W. W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 2nd ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2004. 411 p.
8. Empirical study of the effect of the air filter on the performance and emissions of a diesel engine. Combustion Engines. 2023. Vol. 192(1). P. 1–18. DOI: 10.19206/CE-161881.
9. Heavy-duty vehicle diesel engine efficiency evaluation and energy audit : ICCT Report. 2014. 120 p. URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/HDV_engine-efficiency-eval_WVU-rpt_oct2014.pdf (дата звернення: 02.12.2025).
10. Gailis M., Rudzitis P. Research in Influence of Engine Air Filter Replacement Periodicity. Agronomy Research. 2011. Vol. 9 (Special Issue 1). P. 173–180.
11. Investigation of the Effects of Air Filter Design Changes on Engine Performance in an Automotive Diesel Engine. International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research. 2024. Vol. 8(2). P. 1–12. DOI: 10.29329/ijjaar.2024.4977.

REFERENCES

1. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. 4th ed. London : Palgrave Macmillan, 2012. 516 p.
2. Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2015. 784 p.
3. Bosch R. Diesel-Engine Management. 4th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 504 p.
4. Thomas J., West B., Huff S. Effect of Air Filter Condition on Diesel Vehicle Fuel Economy. SAE Technical Paper 2013-01-0311. Warrendale : SAE International, 2013. 12 p. DOI: 10.4271/2013-01-0311.
5. Annand W. J. D., Roe G. E. Gas Flow in the Internal Combustion Engine. London : Foulis, 1974. 224 p.
6. Huang J., Li L., Huang S. Effect of Air Filter on Performance of S1110 Diesel Engine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 688, art. 022050. DOI: 10.1088/1757-899X/688/2/022050.
7. Pulkrabek W. W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 2nd ed. Upper

Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2004. 411 p.

8. Empirical study of the effect of the air filter on the performance and emissions of a diesel engine. Combustion Engines. 2023. Vol. 192(1). P. 1–18. DOI: 10.19206/CE-161881.

9. Heavy-duty vehicle diesel engine efficiency evaluation and energy audit : ICCT Report. 2014. 120 p. URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/HDV_engine-efficiency-eval_WVU-rpt_oct2014.pdf (data zvernennia: 02.12.2025).

10. Gailis M., Rudzitis P. Research in Influence of Engine Air Filter Replacement Periodicity. Agronomy Research. 2011. Vol. 9 (Special Issue 1). P. 173–180.

11. Investigation of the Effects of Air Filter Design Changes on Engine Performance in an Automotive Diesel Engine. International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research. 2024. Vol. 8(2). P. 1–12. DOI: 10.29329/ijiaar.2024.4977.

Y. Gorbik, S. Krivoshapov, D. Piskovsky. Research on the impact of the technical condition of diesel engine air intake system components on passenger car fuel consumption

This article investigates the impact of the technical condition of air intake system components on the fuel economy of diesel-powered passenger cars. The correlation between the aerodynamic resistance of the intake system and changes in specific fuel consumption is substantiated. Based on experimental data, the authors analyzed the consequences of operational air filter clogging and the loss of intake pipe integrity (leaks).

The study highlights that the air filter is one of the most critical elements of the intake system, as its condition and throughput capacity directly influence engine performance parameters. Increased filter resistance, caused by clogging or the use of low-quality replacements, leads to distorted MAF (Mass Air Flow) sensor readings, disruption of the air-fuel ratio, reduced combustion efficiency, and increased fuel consumption.

This issue is particularly relevant for commercial vehicles operating in high-dust environments, under intensive use, and with extended service intervals. Underestimating the impact of air filter resistance on the fuel system can lead not only to a 5–10% increase in fuel consumption but also to accelerated wear of Common Rail (CR) system components (high-pressure fuel pumps, injectors, pressure regulators), which in turn increases corporate operating expenses.

Quantitative dependencies between the increase in fuel consumption and the degree of intake tract throughput reduction have been established. The research results can be applied to improve maintenance schedules and enhance the diagnostic efficiency of modern internal combustion engine (ICE) air supply systems.

Key words: diesel engine, air intake system, fuel consumption, technical condition, aerodynamic resistance, fuel economy.

ГОРБІК Юрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Кафедра "Інжинірингу систем автомобільного транспорту імені проф. Говорущенко Н.Я.", Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

КРИВОШАПОВ Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Кафедра "Інжинірингу систем автомобільного транспорту імені проф. Говорущенко Н.Я.", Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kaet@khadi.kharkov.ua, ORCID: 0000-0003-4605-6790.

ПІСКОВСЬКИЙ Даниїл Сергійович, магістр, e-mail: daniil.peskovskiy@gmail.com.

Yurij GORBIK, Associate Professor (Assoc. Prof.), Candidate of Science in Engineering (Ph. D. (Eng.)), Department of "Engineering of Road Transport Systems named after Prof. Govorushchenko N.Ya.", Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

Sergy KRIVOSHAPOV, PhD, Associate Professor (Assoc. Prof.), Candidate of Science in Engineering (Ph. D. (Eng.)), Department of "Engineering of Road Transport Systems named after Prof. Govorushchenko N.Ya.", Kharkov National Automobile and Highway University (KhNAHU), e-mail: keat@khadi.kharkov.ua, ORCID: 0000-0003-4605-6790.

Daniil PISKOVSKY, Master, e-mail: daniil.peskovskiy@gmail.com.

Дата надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

<https://doi.org/10.36910/d12qa721>

Дитятьєв О.В.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна***ПРО ПАРАМЕТРИ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛЯ ПРИ ПОГІРШЕННЯ СТАНУ
АМОРТИЗАТОРА**

Історично підвіска виникла та розвивалася на транспортних засобах як засіб забезпечення комфорту. У кінних екіпажах минулого в ходовій частині використовувалася ресорна підвіска. З переходом на механічну тягу збільшилися швидкості руху та вимоги до ходової частини, підвісці, суттєво зросли. Таким чином, підвіска, початковим призначенням якої було забезпечення комфортного переміщення, зі збільшенням швидкостей руху автомобіля набула дуже важливої функції – безпеки руху. Друге призначення виявилось настільки важливим, що відсунуло функцію забезпечення комфорту на другий план. Підвіска легкового автомобіля, що багато в чому визначає його клас, як складова входить до ходової частини і містить напрямну, пружну та демпфуючі компоненти. У свою чергу, пружним компонентом може бути ресора, пневморесора, торсіон або спіральна пружина. Демпфуючий компонент представлений телескопічним амортизатором. Шина, як елемент підвіски, також має пружну та демпфуючу дію. У забезпеченні комфорту з представлених компонентів підвіски найважливішу роль грають пружна і демпфуючі частини, що утворюють коливальну систему з певними параметрами. Будучи досить навантаженими частинами підвіски, вони сприймають ударні навантаження та визначають її частотні, експлуатаційні параметри, ресурс. Демпфуюча частина - амортизатор - відіграє ключову роль у формуванні обох експлуатаційних властивостей, маючи відносно меншу надійність та ресурс. У цій роботі зроблено спробу визначити відношення властивостей через значення відповідних критеріїв для різного технічного стану амортизатора. В якості критеріїв вибрано коефіцієнт EuSAMA та середньоквадратичне значення віброускладнення (за ДСТУ ISO 2631-1:2004)

Ключові слова: безпека руху, амортизатор, вібраційна безпека, імітаційне моделювання

ВСТУП

З пробігом автомобіля погіршуються параметри компонентів підвіски, змінюються найважливіші функції – комфорт та безпека руху. Зношуються сполучення деталей прямої частини, змінюються параметри ресор, пружин, деградує демпфуючий компонент. Щоб утримувати параметри компонентів підвіски в допустимих межах, потрібний постійний контроль. Про необхідність контролю йдеться в керівних документах забезпечення безпеки руху, так і віробезпеки. Контроль безпеки руху здійснюється періодично на стендах із застосуванням методів безрозбірної діагностики або на дорозі з відомим профілем. Система контролю віробезпеки стосовно автомобіля, що знаходиться в експлуатації, по суті, відсутня.

Несправна підвіска є джерелом великих амплітуд прискорення кузова, погіршення комфорту водіння. Зниження комфорту призводить до зниження уваги, продуктивності праці, розвитку втоми під впливом вібрації, ризику виникнення професійної хвороби та патологій. Проте, увагу фахівців більшою мірою привертає зниження безпеки руху у зв'язку з тим, що погіршується стійкість, збільшується гальмівний шлях, прогресує розгойдування кузова при русі, з'являються стукіт та шуми у підвісці, нерівномірне зношування шин, порушення керованості автомобіля. Підвищена увага до питань безпеки руху цілком зрозуміла, проте не слід забувати і про комфорт водіїв та пасажирів, зокрема які перебувають у тривалих поїздках.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Як було зазначено вище, у практиці експлуатації параметри безпеки руху, технічний стан підвіски загалом, демпфуючого та пружного компонентів зокрема, визначаються за допомогою застосування спеціальних стендів. Завдання ускладнюється тим, що контролювати працездатність та проводити локалізацію несправностей доводиться неінвазивно, тобто без розбирання підвіски. З точки зору контролю параметрів безпеки руху, існує кілька сучасних методів діагностування та відповідних засобів [1,2]. Слід зазначити, що підвіска є коливальною системою, ідентифікація параметрів якої на сьогодні не становить труднощів [3]. З досить широкого спектру методів діагностування в даний час поширені два основні (з модифікаціями) [4] - це методи, що використовують гармонійний вплив на підвіску: EuSAMA [5,6] та резонансний метод [7]. Обидва методи та засоби, що їх реалізують (стенди), спрямовані на контроль параметрів, що відповідають за безпеку руху. На ринку автосервісного обладнання представлені, головним чином, лише стенди, що реалізують ці методи в різних модифікаціях. Зокрема, є дані, що на ринку Євросоюзу 80% сегменту займають пропозиції стендів за методом EuSAMA. Тому надалі розглядаємо цей варіант.

Метод EuSAMA передбачає оцінку «коефіцієнта зчеплення» (далі коефіцієнт EuSAMA) шини з опорною поверхнею, що дорівнює відношенню мінімальної за випробування вертикальної сили до статичного навантаження на колесо. Таким чином, коефіцієнт EuSAMA характеризує безпеку руху автомобіля. Разом з тим, стосовно існуючих стендів, відсутні рекомендації щодо оцінки, діагностування властивостей підвіски, відповідальних за комфорт. Це відбувається на тлі збільшення складності автомобілів, зростання вимог до систем комфорту, тобто системам, які забезпечують інший вид безпеки - вібраційну безпеку водіїв та пасажирів. Незважаючи на те, що в керівних документах є вказівки щодо обов'язковості контролю параметрів комфорту під час роботи з технічними засобами, відсутнє методичне забезпечення, стенди, засоби контролю у додатку до автомобілів.

Критеріями комфорту та плавності ходу автомобіля є рівні вібронавантаженості елементів кузова, водія, пасажирів, вантажів. Оцінка рівня вібронавантаженості, згідно з скасованими санітарними правилами та чинними стандартами [8,9,10], проводиться за середньоквадратичними значеннями (С.К.З.) прискорень коливань (віброприскорень) або швидкостей коливань (віброшвидкостей) у вертикальному та горизонтальному напрямках. Відзначається, що головним параметром, відповідальним за безпеку та комфорт, є прискорення вібрацій. Коливання розглядаються в діапазоні частот 1...80 Гц, що розбито на октавні смуги.

Чинний міжнародний стандарт ISO 2631 [11] та відповідний йому стандарт ДСТУ не охоплює потенційних впливів інтенсивної вібрації на працездатність людини, не передбачає конкретні норми та обмеження, тому що, як підкреслено, дана настанова залежить від ситуації та мети завдання. Оцінка людиною відчуттів від вібрації проводиться, зокрема, також із середньоквадратичним прискоренням з урахуванням тривалості впливу коливань.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Існуючі вимоги щодо безпеки руху та безпеки праці водія, пасажирів, що передбачають регулярний контроль технічного стану об'єкта (підвіски), викладено в різних нормативних документах. Критерії оцінки мають різну природу та різні розмірності. Метою даної роботи є спроба визначити ступінь впливу технічного стану демпфуючого компонента підвіски на показники комфорту, а також оцінити можливості існуючих методів та засобів здійснювати контроль за показниками комфорту підвіски. У зв'язку з відсутнім методичним та апаратним забезпеченням вимог вібраційної безпеки стосовно автомобілів, поставлено завдання перевірки можливостей використовувати для цих цілей існуючі стенди зі стандартними гармонічними сигналами збудження підвіски.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З боку безпеки руху, як критерій, відповідальний за технічний стан підвіски, обраний коефіцієнт EuSAMA як найбільш застосовуваний та забезпечений пропозиціями відповідних стендів від різних фірм-виробників.

З боку вібраційної безпеки водія та пасажирів, відповідно до чинного стандарту, як критерій вибрано середньоквадратичне значення прискорення коливань.

Основним методом дослідження прийнято моделювання. Метод довів свою спроможність у численних дослідженнях [12,13]. Прийнято двомасову модель [14], показники безпеки руху знімалися з невіднесеної маси, а з віднесеної маси знімалися показники вібраційного навантаження. Моделювання проводилося серед Matlab/Simulink. Як об'єкт моделювання прийнято 1/4 частину автомобіля з параметрами, представленими в таблиці 1.

Допущення, прийняті у розрахунку:

- збудження підвіски гармонічним сигналом із зростаючою частотою від 0 до 45 Гц;
- облік лише вертикального коливального руху підвіски;
- ізолювана «чверть підвіски» автомобіля;
- двомасова модель з двома ступенями свободи;
- лінійна характеристика пружних елементів c_1 , c_2 .

Таблиця 1. Параметри моделі для розрахунку

Показник	Значення	Одиниця виміру
Амплітуда нерівності	$A = 0,003$	м
Маса кузова	$m_1 = 384$	кг
Жорсткість пружини	$c_1 = 25000$	Н/м

Демпфірування амортизатора	$b_1 = 3000 \dots 450$	H^*c/m
Сухе тертя в підвісці	$s = 15$	H^*c/m
Непідресорена маса	$m_2 = 35$	кг
Жорсткість шини	$c_2 = 273$	кН/м
Демпфірування шини	$b_2 = 190$	H^*c/m

Початок інтегрування – 0 с, кінець інтегрування – 45 с.

Зміна технічного стану підвіски (погіршення демпфірування) моделювалася застосуванням різних значень коефіцієнта демпфірування амортизатора для станів "Добре", "Досить", "Недостатньо", "Погано".

При виборі граничних значень критерію безпеки руху різних станів – коефіцієнта EuSAMA - бралася до уваги його залежність від навантаження на колесо [15]. Для компенсації залежності використовувалися різні норми коефіцієнтів для станів: "Добре", "Досить", "Недостатньо", "Погано", таблиця 2.

Таблиця 2 - Відповідність коефіцієнтів EuSAMA та коефіцієнтів демпфірування амортизаторів при вибраних параметрах моделі

Оцінка: верхній край діапазону:	Коефіцієнт EuSAMA, %	Коефіцієнт демпфірування амортизатора, H^*c/m
«Добре» (Зона А)	70-100	1065 - 3000
«Досить» (Зона В)	50-69	700 - 1065
«Недостатньо» (Зона С)	30-49	650 - 700
«Погано» (Зона D)	20-29	450 - 650
«Дуже погано» (Зона Е)	0-19	0 - 450

Для отримання порівняних даних з розрахунком вібраційної безпеки весь спектр коливань підресорної частини розділений на 6 октавних смуг, таблиця 3.

Таблиця 3. Характеристики октавних смуг

Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц	Граничні частоти октав, Гц
1,0	0,7...1,4
2,0	1,4...2,8
4,0	2,8...5,6
8,0	5,6...11,2
16,0	11,2...22,4
31,5	22,4...44,9

У кожній октавній смузі знаходилося максимальне значення амплітуди динамічної сили та по ній розраховувався коефіцієнт EuSAMA. Результати розрахунку представлені у таблиці 4.

На рисунку 1 представлена залежність коефіцієнта EuSAMA від частоти, поділеної на шість октавних смуг, для трьох характерних значень коефіцієнта демпфірування амортизатора. Коефіцієнт EuSAMA відкладався від середньгеометричного значення частоти смуги. При цьому на осі абсцис середньгеометричне значення частоти відображалось як категорії, тобто поза масштабом.

Таблиця 4. Результати імітаційного моделювання за критерієм безпеки руху

Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц	Коефіцієнт EuSAMA при коефіцієнті демпфірування				
	3000	1065	700	650	450
1,0	79,7	79,5	78,0	79,1	79,1
2,0	78,2	79,0	78,0	78,7	77,6
4,0	79,7	78,7	78,7	79,1	78,1
8,0	78,2	66,0	62,6	63,7	60,6
16,0	90,1	50,1	35,2	31,9	10,4

31,5	90,1	85,9	86,4	85,5	86,4

Для цих умов на рисунку нанесено граничне мінімальне значення коефіцієнта демпфірування амортизатора (лінія А-А), отримане за умови безпеки руху. Це значення приймалося рівним 50 Н с/м.

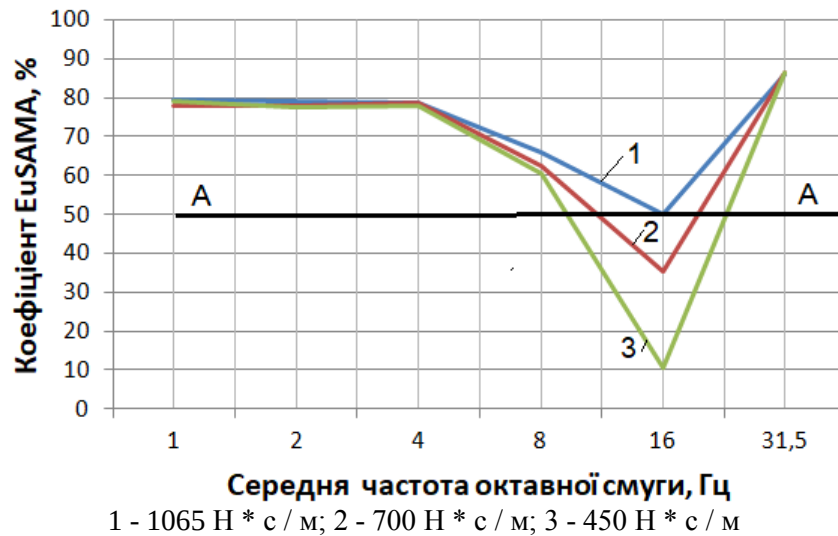


Рисунок 1. Значення коефіцієнта EuSAMA у октавних смугах частот

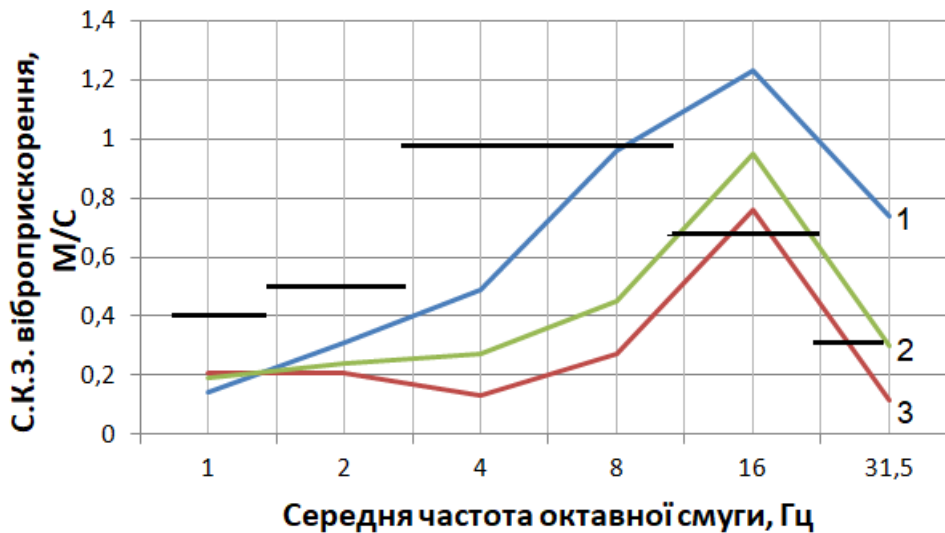
Як видно з рисунка, є одна область екстремальних значень коефіцієнтів EuSAMA (мінімум), при частоті коливань, що вимушують, рівної 14,8 Гц, в смузі частот 11,2 ... 22,4 Гц. Ця частота близька до власної частоти непіддресореної частини і саме в цій галузі частот зростання коефіцієнта демпфування супроводжується зростанням коефіцієнта EuSAMA. При цьому при значенні коефіцієнта EuSAMA менше 50 з'являються передумови та умови для відриву колеса від опорної поверхні з загрозою безпеки руху.

Оцінка відчуттів від коливань людиною проводиться, зокрема, з прискорення вібрації. П.6 ДСТУ [10] свідчить, що основним методом оцінки впливу вібрації є виважене середньоквадратичне значення (С.К.З.) прискорення. У розрахунку використовувалися С.К.З. віброприскорень за тих самих умов, що й у попередньому випадку: у шести октавних смугах для п'яти значень коефіцієнтів демпфірування. Дані розрахунку з вібраційної безпеки (комфорту) представлені у таблиці 5 та на рисунку 2. Тут з осі абсис, як і попередньому випадку, як категорій, тобто поза масштабом, відкладена частота гармонійного впливу на підвіску, по осі ординат – середньоквадратичне значення прискорення коливань в октавних смугах частот. У цьому С.К.З. прискорення у смузі відзначалося точково у середині смуги.

Як видно з рисунка 2, С.К.З. прискорення вібрації для всіх значень коефіцієнтів демпфірування амортизаторів має глобальний екстремум у районі п'ятої октавної смуги. Локальний мінімум для $C_2=450$ Н*с/м розташований у третій октавній смузі 4 Гц (пікове значення амплітуди відповідає частоті 5,6 Гц). Звертає на себе факт зниження С.К.З. прискорення зі зростанням коефіцієнта демпфірування амортизатора.

Таблиця 5. Результати імітаційного моделювання за критерієм вібраційної безпеки

Середньогеометрична частота октавної смуги, Гц	С.К.З. віброприскорення при коефіцієнті демпфірування				
	3000	1065	700	650	450
1,0	0,14	0,19	0,20	0,20	0,21
2,0	0,31	0,24	0,23	0,23	0,21
4,0	0,49	0,27	0,15	0,14	0,13
8,0	0,96	0,45	0,36	0,34	0,27
16,0	1,23	0,94	0,85	0,81	0,76
31,5	0,74	0,31	0,20	0,18	0,16



1 - $3000 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 2 - $1065 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 3 - $450 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$

Рисунок 2. Значення С.К.З. прискорення в октавних смугах частот

Гранично допустимі значення С.К.З. - норми вібраційного впливу прискорення, розраховуються з урахуванням різниці сприйняття людиною віброприскорень різних частот та різних експозицій. При цьому ДСТУ зазначається, що допустимі значення залежать від багатьох факторів, які варіюються в залежності від конкретного застосування. Це стосується й різного контингенту: для пасажирів, водіїв характер реакцій на віброприскорення і, відповідно, норми, буде різними. Зокрема, з урахуванням допустимої дії на здоров'я водія, при тривалості дії 8 годин, нормативне С.К.З. віброприскорення дорівнює $0,66 \dots 0,94 \text{ м/с}^2$.

Якщо взяти допустиме С.К.З. віброприскорення рівним $0,89$, то скориговані за частотою, відповідно до додатка ДСТУ [10], гранично допустимі значення дорівнюватимуть значенням у таблиці 6:

Таблиця 6. Скориговані за частотою С.К.З. віброприскорення

Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц	Коефіцієнт корекції, дБ	Скориговані С.К.З. віброприскорення, м/с^2
1,0	- 7	0,4
2,0	- 5	0,5
4,0	0	0,89
8,0	0	0,89
16,0	- 3	0,63
31,5	- 9	0,32

На рисунку 2 скориговані норми С.К.З. віброприскорення в м/с^2 нанесені чорними лініями, паралельними до осі абсис. Як видно з рисунка, для обраних значень параметрів підвіски та збуджуючого сигналу, у високочастотній частині спектра є перевищення над нормативними показниками, причому перевищення тим більше, чим вищий коефіцієнт демпфування амортизатора або чим кращий його технічний стан. Критичною зоною є смуга частот $11,2 \dots 22,4 \text{ Гц}$. Тут слід додати, що розрахункові значення С.К.З. віброприскорення не враховують демпфування у місцях кріплення переднього мосту до кузова, оббивки кузова, сидінь. У свою чергу, норма, що визначається на основі реакцій, може мати значний розкид значень залежно від різних факторів, у тому числі від очікуваних дій людини.

Норма коефіцієнта EuSAMA за технічним станом амортизатора виконується при значеннях коефіцієнта демпфування, що дорівнює 50% , і вище. Для виконання норми віброприскорення необхідно, навпаки, знижувати коефіцієнт демпфування. Це унеможливує використання будь-якого з обох критеріїв як універсального. При цьому критерій віброприскорення більш жорсткий, ніж критерій безпеки руху.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження свідчать про можливість використання існуючих стендів для контролю за параметрами комфорту легкових автомобілів.

Перевищення нормативних показників комфорту над розрахунковими для справних амортизаторів свідчить про необхідність підбору амплітуди тестового впливу.

Для обох видів властивостей є критична частотна смуга, усередині якої параметри властивостей максимальні. У цій же смузі розташована власна частота непідресореної частини.

Внаслідок різноспрямованості залежностей від коефіцієнта демпфірування критеріїв - коефіцієнта EuSAMA та С.К.З. віброприскорення, жоден із критеріїв не може бути використаний як універсальний.

Критерій стану амортизатора за комфорту (віброприскоренням) суворіший за критерій безпека руху (коефіцієнт EuSAMA).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Техническое обслуживание, ремонт и хранение автотранспортных средств: Учебник: В 3 кн. К.: Выща шк., 1991. – Кн. 1. Теоретические основы. / В.Е. Канарчук, А.А. Лудченко, И.П. Курников, И.А. Луйк. – 359 с. ил.
2. Gardulski J 2006 Badania diagnostyczne amortyzatorów. - DIAGNOSTYKA'2 (38)/2006, pp 187-198.
3. Daniel Graupe. Identification of System. Colorado State University, Fort Collins. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington. New York, 1976.
4. Дитятьєв О.В. Щодо питання вибору типу вібростенду для діагностування підвіски автомобіля. У науковому журналі «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ» № 2 (21) ЛУЦЬК, 2023 - С 91-100. <https://DOI.10.36910/automash.v2i21.1213>.
5. EuSAMA TS-02-76, code (1976) 'Recommendation for performance test specification of car vehicle suspension testing system', European Shock Absorber Manufacturers Association.
6. Simulation analysis of the EUSAMA Plus suspension testing method including the impact of the vehicle untested side. - K Dobaj 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 148 012034
7. MSD 3000 Стенд проверки демпфирующих свойств подвесок автомобилей : вебсайт. URL: <https://equinet.com.ua/ru/amortizatorov-proverki-stendy/2365-stend-proverki-amortizatorov-maha-msd-3000-euro.html> (дата звернення 13.01.2026).
8. СП 4616-88. Санитарные правила по гигиене труда водителей автомобилей: вебсайт. URL: https://dnaop.com/html/57405_2.html (дата звернення 13.01.2026).
9. ДСТУ ГОСТ 12.1.0122008 Вибрационная-безопасность. - Общие требования: вебсайт. URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=30043 (дата звернення 13.01.2026).
10. ДСТУ ISO 2631-1:2004 Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину. Частина 1. Загальні вимоги (ISO 2631-1:1997, IDT),
11. ISO 2631 Mechanical vibration and shock —Evaluation of human exposure to whole-body vibration —Part 1: General requirements.
12. Marek Guzek, Piotr Zdanowicz* DIAGNOSTICS OF THE ON-VEHICLE SHOCK ABSORBER TESTING. Mechanical Engineering in Transport. - Faculty of Transport, Warsaw University of Technology, Warsaw - ISSN 2585-7878.
13. Zbigniew Lozia. APPLICATION OF MODELLING AND SIMULATION TO EVALUATE THE THETA METHOD USED IN DIAGNOSTICS OF AUTOMOTIVE SHOCK ABSORBERS. Faculty of Transport, Warsaw University of Technology, Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, e-mail: zbigniew.lozia@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-3188-545X
14. Дитятьєв О.В., Рева В.Б. Про похибку стендового контролю підвіски. У науковому журналі «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ» №2 (19) ЛУЦЬК 2022 с.81...88. DOI 10.36910/automash.v2i19.906
15. Gardulski J 2006 Badania diagnostyczne amortyzatorów. - DIAGNOSTYKA'2 (38)/2006, pp 187-198.

REFERENCES

1. Tekhnicheskoe obsluzhivaniye, remont y khraneniye avtotransportnykh sredstv: Uchebnyk: V 3 kn. K.: Vysshcha shk., 1991. – Kn. 1. Teoreticheskiye osnovy. / V.E. Kanarchuk, A.A. Ludchenko, Y.P. Kurnikov, Y.A. Luik. – 359 s. yl.
2. Gardulski J 2006 Badania diagnostyczne amortyzatorów. - DIAGNOSTYKA'2 (38)/2006, pp 187-198.

3. Daniel Graupe. Identification of System. Colorado State University, Fort Collins. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington. New York, 1976.
4. Dytatiev O.V. Shchodo pytannia vyboru typu vibrostendu dlia diahnostuvannia pidvisky avtomobilia. U naukovomu zhurnali «SUCHASNI TEKHNOLOHII V MASHYNObUDUVANNI TA TRANSPORTI» № 2 (21) LUTsK, 2023 - S 91-100. <https://DOI.10.36910/automash.v2i21.1213>.
5. EuSAMA TS-02-76, code (1976) 'Recommendation for performance test specification of car vehicle suspension testing system, European Shock Absorber Manufacturers Association.
6. Simulation analysis of the EUSAMA Plus suspension testing method including the impact of the vehicle untested side. - K Dobaj 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 148 012034
7. MSD 3000 Stend proverky dempfyruishchyykh svoistv podvesok avtomobylei: vebсайт. URL: <https://autom.com.ua/ru/stend-proverki-amortizatorov-msd-3000-euro-maha-germaniya> (data zvernennia 13.01.2026).
8. SP 4616-88. Sanytarnyye pravyla po hyhyene truda vodytelei avtomobylei: vebсайт. URL: https://dnaop.com/html/57405_2.html (data zvernennia 13.01.2026).
9. DSTU HOST 12.1.0122008 Vybratsyonnaia-bezopasnost. - Obshchye trebovaniya: vebсайт. URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=30043 (data zvernennia 13.01.2026)
10. DSTU ISO 2631-1:2004, Vibratsiia ta udar mekhanichni. Otsinka vplyvu zahalnoi vibratsii na liudynu. Chastyna 1. Zahalni vymohy (ISO 2631-1:1997, IDT),
11. ISO 2631 Mechanical vibration and shock —Evaluation of human exposure to whole-body vibration —Part 1: General requirements.
12. Marek Guzek, Piotr Zdanowicz* DIAGNOSTICS OF THE ON-VEHICLE SHOCK ABSORBER TESTING. Mechanical Engineering in Transport. - Faculty of Transport, Warsaw University of Technology, Warsaw - ISSN 2585-7878.

O. Dityatyev. About the safety parameters of a car in the event of a shock absorber's deterioration

Historically, suspension originated and developed on vehicles as a means of ensuring comfort. In horse-drawn carriages of the past, a spring suspension was used in the chassis. With the transition to mechanical traction, speeds of movement and requirements for the chassis increased, and suspensions grew significantly. Thus, the suspension, the initial purpose of which was to ensure comfortable movement, with increasing vehicle speeds acquired a very important function - traffic safety. The second purpose turned out to be so important that it pushed the function of ensuring comfort into the background. The suspension of a passenger car, which largely determines its class, as a component is included in the chassis and contains guide, elastic and damping components. In turn, the elastic component can be a spring, air spring, torsion or coil spring. The damping component is represented by a telescopic shock absorber. The tire, as a suspension element, has an elastic and damping effect. In ensuring comfort, the most important role is played by the elastic and damping parts, which form an oscillatory system with certain parameters. Being sufficiently loaded parts of the suspension, they perceive shock loads and determine its frequency, operational parameters, and resource. The damping part - the shock absorber - plays a key role in the formation of both operational properties, having relatively lower reliability and resource. In this work, an attempt is made to determine the ratio of properties through the values of the corresponding criteria for different technical conditions of the shock absorber. The EuSAMA coefficient and the root-mean-square value of the vibration complication (according to DSTU ISO 2631-1:2004) were chosen as criteria.

Keywords: traffic safety, shock absorber, vibration safety, simulation modeling.

ДИТЯТЬЄВ Олександр Васильович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри експлуатації та сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет e-mail: alex-dit@ukr.net <https://orcid.org/0009-0004-1897-8813>

Oleksandr DITYATYEV – Ph. D. (Ing.), Senior Research Fellow, Associate Professor of the Department of Technical operation and service of cars, Kharkiv National Automobile and Highway University e-mail: alex-dit@ukr.net <https://orcid.org/0009-0004-1897-8813>

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/njj6gs35>

Доля К.В.

Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ВУЗЛА ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИМИ ТА ВАНТАЖНИМИ ПОТОКАМИ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

У статті досліджено підвищення ефективності оперативного керування мультимодальним транспортним вузлом в умовах мінливого попиту, конкуренції пасажирських і вантажних потоків за спільні ресурси та випадкових збурень. Мета роботи — розробити концептуально-методичну основу цифрового двійника, що підтримує диспетчерські рішення в реальному часі через поєднання моніторингу, короткострокового прогнозування, сценарної перевірки та багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано інтегровану модель стану вузла з урахуванням попиту, насичення інфраструктури, часу пересадки, тривалості вантажної обробки та якості даних. У керуючому контурі реалізовано вибір дій за критерієм мінімізації зважених втрат із дієвою поправкою на ризик, що дозволяє відсікати нестійкі рішення. Для верифікації виконано обчислювальний експеримент на тестовому вузлі з двома режимами: базовим правилним і сценарно-адаптивним у контурі цифрового двійника. Отримано покращення ключових показників: зниження середніх затримок, частки перевантажених зон, часу пересадки та тривалості вантажної обробки, а також зростання індексу стабільності. У стрес-сценарії підтверджено вищу дієвість підходу: нижчі пікові перевантаження й швидше відновлення до штатного режиму. Наукова новизна полягає в інтеграції пасажирського і вантажного контурів у єдиний адаптивний постановці керування та в обґрунтуванні компромісної області ваг цільової функції. Практичне значення результатів полягає у можливості створення системи підтримки диспетчерських рішень для міських транспортно-логістичних хабів із подальшим масштабуванням. Запропонований підхід також враховує вплив якості телеметричних даних: за контрольованого рівня пропусків і затримок ефективність керування зберігається, тоді як деградація data governance знижує точність прогнозу й якість рекомендацій. Підхід придатний для поетапної інтеграції в чинні міські платформи транспортного моніторингу.

Ключові слова: цифровий двійник, мультимодальний транспортний вузол, адаптивне керування, пасажирські потоки, вантажні потоки, багатокритеріальна оптимізація, диспетчерські рішення, реальний час.

ВСТУП

Мультимодальні транспортні вузли в сучасних містах виконують роль ключових точок взаємодії пасажирських і вантажних потоків, поєднуючи залізничний, автомобільний, міський рейковий, автобусний та інші види транспорту в єдиному операційному контурі. Саме на рівні вузла формуються критичні часові й просторові взаємозалежності: стикування розкладів, пропуск пасажирів через пересадкові зони, обробка вантажів у термінальних секторах, розподіл інфраструктурних ресурсів у пікові періоди. За умов зростання мобільності населення, розвитку e-commerce та підвищення вимог до швидкості обслуговування традиційні підходи до диспетчеризації, що базуються на статичних правилах і періодичному оновленні даних, дедалі частіше виявляються недостатніми.

Практика експлуатації показує, що навіть локальні збурення (затримка прибуття, перевантаження платформи, збій у термінальній операції, обмеження доступу на окрему ділянку) можуть спричинити каскадні наслідки для суміжних модальностей. Це проявляється у зростанні часу пересадки, накопиченні черг, зниженні регулярності обслуговування та підвищенні операційних витрат. Проблема ускладнюється тим, що пасажирський і вантажний контури часто конкурують за спільні ресурси вузла (під'їзні шляхи, часові вікна, персонал, інформаційні канали), а рішення, оптимальне для однієї підсистеми, може погіршувати показники іншої. Отже, для ефективного керування необхідна не лише фіксація поточного стану, а й здатність прогнозувати розвиток ситуації та оцінювати наслідки альтернативних керуючих дій до їх реалізації.

Перспективним інструментом для розв'язання цієї задачі є цифровий двійник мультимодального транспортного вузла — динамічна цифрова модель, синхронізована з фізичним об'єктом у режимі, наближеному до реального часу. На відміну від класичних інформаційно-аналітичних систем, цифровий двійник поєднує моніторинг, прогнозування, імітаційне тестування та модуль прийняття рішень у єдиному середовищі. Це дозволяє перейти від реактивного керування до проактивного: попереджувати перевантаження, адаптувати режими обслуговування, перерозподіляти потоки та підтримувати стійкість роботи вузла за умов невизначеності.

Таким чином, актуальність теми визначається потребою в науково обґрунтованій методиці інтегрованого керування мультимодальним вузлом, яка враховує взаємодію пасажирських і вантажних процесів, обмеження інфраструктури та вимоги до якості сервісу. Розроблення підходу на базі цифрового двійника створює практичну основу для підвищення надійності транспортної системи, скорочення втрат часу та покращення операційної ефективності в умовах реального міського середовища.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження цифрових двійників у транспорті формують цілісну, але ще неоднорідну наукову базу. У фундаментальних працях цифровий двійник трактується як динамічна кіберфізична модель, що синхронізується з реальним об'єктом за потоковими даними та підтримує прогнозно-управлінські функції [1-2]. Для транспортної сфери ключовим є перехід від «цифрової вітрини» до інструменту оперативного керування, де модель не лише відображає стан вузла, а й тестує сценарії дій до їх впровадження [3-4].

Важливим напрямом є прогнозування пасажиропотоків у складних мережах. Публікації останніх років показують високу ефективність просторово-часових моделей на базі графових архітектур, які враховують топологію станцій, міжлінійні залежності та добову нерівномірність попиту [5-6]. Для міських хабів це критично, оскільки якість короткострокового прогнозу безпосередньо визначає можливість раннього виявлення зон перевантаження. Водночас навіть точний прогноз сам по собі не вирішує проблему: у практиці потрібен формалізований зв'язок між прогнозом та керуючою дією, з урахуванням ресурсних і сервісних обмежень [7].

Окремий блок досліджень стосується логістичних та інтермодальних систем, де цифрові двійники застосовують для управління терміналами, чергами, слотами обробки та використанням інфраструктури [8-9]. У цих роботах доведено, що синхронізація фізичного та цифрового контурів дозволяє зменшити простой і стабілізувати час операцій. Проте для мультимодального вузла змішаного типу (пасажир + вантаж) цього недостатньо: рішення, оптимальне для вантажного сектора, може погіршити якість пасажирських пересадок, і навпаки. Тому в центрі сучасної проблематики знаходиться багатокритеріальна узгодженість управління між підсистемами [10-11].

У роботах з транспортної стійкості підкреслюється, що саме мультимодальні мережі є найбільш чутливими до локальних інцидентів через каскадне поширення ефектів між модальностями [12-13]. Для таких умов пропонують дієві та сценарні підходи, де рішення оцінюють не в одному «середньому» стані, а в множині сценаріїв попиту, затримок, відмов обладнання та обмежень пропускної спроможності [14]. Це особливо важливо для вузлів реального часу, де вартість запізнілої реакції різко зростає в пікові інтервали.

Паралельно формується напрям енергоефективного та сталого управління транспортними системами. Низка досліджень показує, що для цифрових двійників доцільно одночасно оптимізувати часові, сервісні та енергетичні показники, а не мінімізувати лише затримки [15-16]. Такий підхід дозволяє уникати ситуацій, коли локально «швидко» рішення створює довгостроково вищі витрати та більшу вуглецеву інтенсивність. Для мультимодального вузла це означає необхідність інтегрованої функції цілей, яка балансує надійність, швидкість, пропускну спроможність і ресурсну ефективність [17].

Значна частина сучасної літератури також присвячена якості даних для цифрових двійників. Показано, що похибки часової синхронізації, неоднорідність форматів, пропуски телеметрії та затримки в каналах передачі даних прямо впливають на точність прогнозу й коректність диспетчерських рекомендацій [18-19]. Тому практично всі зрілі архітектури включають окремий контур data governance: валідацію потоків, очищення даних, контроль аномалій і моніторинг повноти сигналів [20].

Ще один важливий аспект — мережеве планування маршрутів і перерозподіл потоків у невизначених умовах. Для пасажирських і вантажних процесів активно використовують дієві, багатокритеріальні та стохастичні постановки задач маршрутизації [21-22]. У публікаціях доведено, що за умов мінливого попиту найкращі результати дає поєднання прогнозування з адаптивною переоптимізацією маршрутів і графіків [23]. Це безпосередньо узгоджується з логікою цифрового двійника як платформи «прогноз—сценарій—рішення» [24].

Отже, аналіз літератури дозволяє сформулювати проблему дослідження так: попри значний прогрес у прогнозуванні, імітаційному моделюванні та цифровізації терміналів, недостатньо опрацьованою залишається єдина модель цифрового двійника мультимодального транспортного вузла, яка в реальному часі інтегрує пасажирські й вантажні потоки, підтримує багатокритеріальне

керування та забезпечує стійкість рішень до збурень. Саме усунення цієї методичної прогалини є необхідною передумовою підвищення надійності та ефективності сучасних транспортно-логістичних вузлів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль дослідження. Розробити концептуально-методичну основу цифрового двійника мультимодального транспортного вузла для адаптивного керування пасажирськими та вантажними потоками в реальному часі з урахуванням обмежень пропускної спроможності, сервісної надійності та стійкості до збурень.

Об'єкт дослідження. Процеси функціонування мультимодального транспортного вузла, у межах яких відбувається взаємодія пасажирських і вантажних потоків, розподіл інфраструктурних ресурсів та оперативне диспетчерське керування. Предмет дослідження. Методи, моделі та алгоритми цифрового двійника для прогнозування стану вузла, вибору керуючих дій і оцінювання їх ефективності в режимі реального часу.

Проблеми, що розглядаються у роботі:

відсутність єдиного контуру керування, який одночасно враховує пасажирські та вантажні потоки в межах одного вузла;

запізнена реакція диспетчерських рішень на пікові навантаження та локальні збурення в умовах швидкої зміни попиту;

конфліктність цілей керування (мінімізація затримок, зниження перевантаження, збереження сервісної якості та стабільність вантажних операцій).

Задачі дослідження:

побудувати інтегровану структуру цифрового двійника, що поєднує моніторинг, короткострокове прогнозування та сценарну перевірку рішень;

формалізувати багатокритеріальну задачу адаптивного керування і визначити правила вибору керуючих впливів для реального часу;

оцінити стійкість запропонованого підходу до типових збурень (пікові навантаження, локальні відмови, збої графіка) та визначити практичні умови впровадження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Організація обчислювального експерименту. Для перевірки працездатності сценарноадаптивного багатокритеріального підходу керування в контурі цифрового двійника сформовано тестовий мультимодальний вузол із трьома пасажирськими контурами (приміська залізниця, міський автобус, трамвай) та одним вантажним контуром термінальної обробки. Вузол подано орієнтованим графом $G = (V, E)$, де вершини V відповідають платформам, пересадковим коридорам, вхідним групам і вантажним фронтам, а дуги E — можливим траєкторіям руху пасажирів, транспортних одиниць і вантажних потоків. Для оперативного керування обрано ковзний горизонт 15 хв, крок оновлення стану — 1 хв, крок переобчислення рішення — 5 хв.

Початковий профіль попиту сформовано на основі типового робочого дня з вираженим ранковим і вечірнім піками. У моделі враховано: інтенсивності вхідного пасажирського потоку за напрямками, заявки на термінальні операції, доступність колій/платформ, часові вікна для вантажних маневрів, а також стохастичні збурення (випадкові затримки прибуття, короткочасні обмеження пропускної спроможності, локальні перевантаження зон пересадки).

Альтернативи керування та логіка порівняння. Порівняння виконано для двох режимів базовий та запропонований. Базовий — традиційне керування без цифрового двійника. Рішення приймаються за фіксованими порогами заповнення й затримки. Запропонований — цифровий двійник + сценарно-адаптивна багатокритеріальна оптимізація з перевіркою рішення на множині короткострокових сценаріїв.

Для кожного кроку t система генерує набір допустимих дій $U(t)$ та множину сценаріїв збурень Ω_t . Кандидатна дія $u \in U(t)$ оцінюється за очікуваною втратою та робастною поправкою (1):

$$L(u, t) = E_{\omega \in \Omega_t} [J(u, \omega, t)] + \lambda \text{CVaR}_\alpha(J), \quad (1)$$

де λ — коефіцієнт ризик-аверсії, CVaR_α — умовний ризик у хвості розподілу втрат.

Формалізація стану та керуючих дій забезпечується через вектор стану вузла (2):

$$x(t) = qp(t), qf(t), pk(t), \tau tr(t), \tau fr(t), \eta(t), \quad (2)$$

де q_p — пасажирський попит, q_f — вантажний попит, ρ_k — насичення критичного елемента інфраструктури, τ_{tr} — середній час пересадки, τ_{fr} — середній час вантажної обробки, η — індекс інформаційної визначеності (повнота та своєчасність даних).

Керуючий вектор має вигляд наведений в (3):

$$u(t) = \Delta h(t), \Delta r(t), \Delta s(t), \Delta I(t), \Delta a(t), \quad (3)$$

де Δh — корекція інтервалів руху, Δr — перерозподіл маршрутів, Δs — зміна слотів термінальної обробки, ΔI — інформаційні впливи на пасажирів, Δa — активація резервних ресурсів.

Цільову функцію на кроці керування визначено як (4) та (5):

$$J(t) = w_1 T_{delay}(t) + w_2 P_{over}(t) + w_3 T_{transfer}(t) + w_4 T_{freight}(t) + w_5 E_e(t), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad (5)$$

де додано компоненту $E_e(t)$, що відображає енергетично-ресурсну інтенсивність керуючих дій. Для базової конфігурації прийнято $w_1 = 0.30$, $w_2 = 0.25$, $w_3 = 0.20$, $w_4 = 0.15$, $w_5 = 0.10$.

Налаштування експерименту та перевірка збіжності. Імітація охоплює 120 керуючих циклів (еквівалент робочого дня) для кожного режиму. Щоб зменшити вплив випадковості, виконано 30 прогонів Монте-Карло з різними реалізаціями збурень. Порівняння проводилося за середнім значенням показника, стандартним відхиленням та 95%-довірчим інтервалом. Додатково перевірено часову стабільність рішення: частку кроків, на яких система не переходить у критичний режим ($\rho_k > 1.15$ або τ_{tr} перевищує цільовий поріг більш ніж на 30%).

Узагальнені результати по всьому горизонту. У таблиці 1 наведено середні значення ключових індикаторів.

Таблиця 1: Порівняння результатів керування мультимодальним вузлом.

Показник	Сценарій А	Сценарій В
T_{delay} , хв	8.6	5.9
P_{over} , %	24.8	14.1
$T_{transfer}$, хв	11.4	8.7
$T_{freight}$, хв	46.2	39.8
E , ум. од.	1.00	0.91
R_{stable} , %	71.3	84.9

У відносному вимірі запропонований підхід забезпечив зниження середніх затримок на 31%, скорочення частки перевантажених зон на 43%, зменшення часу пересадки на 24% і часу вантажної обробки на 14%. Додатково зафіксовано зниження ресурсно-енергетичної інтенсивності на 9% за рахунок більш рівномірного використання інфраструктури та зменшення кількості аварійних коригувань. Індекс стійкості виконання зріс на 13.6 в.п., що свідчить про кращу здатність системи утримувати робочий режим без переходу до кризових станів.

Динаміку у пікових інтервалах враховано й для поглибленого аналізу виділено ранковий пік (цикли 25–45) і вечірній пік (цикли 80–105). У базовому сценарії спостерігалось накопичення пасажирських черг і відкладення вантажних слотів, що створювало конфлікт у використанні під'їзних колій та платформ. У запропонованому сценарії цифровий двійник за 10–15 хв до досягнення критичних порогів ініціював превентивні дії: часткову зміну інтервалів, переорієнтацію пасажирських потоків через альтернативні коридори й корекцію черги вантажної обробки.

Якісно це дало два ефекти. По-перше, пікові значення ρ_k стали нижчими і коротшими в часі; по-друге, зменшився «хвіст відновлення», тобто період повернення системи до штатних параметрів після піку. У практичному вимірі це означає меншу імовірність каскадного поширення затримок на суміжні модальності.

Результати стрес-тесту на комбіноване збурення. Для оцінки робастності застосовано стрес-сценарій: раптове зростання пасажиропотоку на 18% протягом 40 хв при одночасному зменшенні доступної пропускної спроможності однієї платформи на 15%, таблиця 2.

Таблиця 2: Поведінка системи у стрес-сценарії.

Метрика стрес-тесту	Сценарій А	Сценарій В
Максимальне насичення ρ_{max}	1.34	1.12
Тривалість перевантаження, хв	67	39
Середній додатковий час пересадки, хв	6.1	3.2
Відхилення вантажних слотів, %	19.5	11.3
Час повернення до штатного режиму, хв	74	52

Отримані значення показують, що сценарно-адаптивне керування не лише знижує пік перевантаження, а й пришвидшує відновлення приблизно на 22 хв. Ключовим механізмом є випереджувальний перерозподіл навантаження: система тимчасово зменшує конфлікт за критичні ресурси між пасажирським та вантажним контурами, після чого поетапно повертає планові параметри.

Чутливість до ваг багатокритеріальної функції. Окремо виконано серію експериментів зі зміною ваг w_i у межах ± 0.10 від базових значень. Виявлено, що модель є помірно чутливою до зміщення акценту між пасажирськими та вантажними цілями. Зокрема, підвищення w_3 (пріоритет пересадки) покращує пасажирський сервіс у пікові періоди, але може незначно збільшувати $T_{freight}$; натомість підвищення w_4 стабілізує термінальні операції ціною дещо більшого часу пересадки. Компромісна область ваг, за якої зберігається приріст усіх ключових метрик відносно базового сценарію, має вигляд (6):

$$0.25 \leq w_1 \leq 0.35, 0.20 \leq w_2 \leq 0.30, 0.15 \leq w_3 \leq 0.25, 0.10 \leq w_4 \leq 0.20, 0.05 \leq w_5 \leq 0.15. \quad (6)$$

Це підтверджує практичну придатність підходу: диспетчер може змінювати пріоритети під конкретний операційний контекст без втрати системної стійкості.

Вплив якості даних на результат керування. Оскільки цифровий двійник працює у потоковому режимі, проаналізовано чутливість до деградації даних: штучно вводили пропуски телеметрії (5%, 10%, 15%) і затримки оновлення (до 90 с). За рівня пропусків до 10% за наявності модулів валідації та реконструкції даних погіршення ключових метрик не перевищувало 4%. При 15% пропусків і затримці понад 60 с ефективність керування знижувалася істотніше: частка перевантажених зон зростала на 6–8% відносно номіналу, а індекс стійкості втрачав до 5 в.п. Це вказує на необхідність підтримувати регламент якості даних як обов'язковий елемент експлуатації цифрового двійника.

Оцінка статистичної значущості. Для головних метрик виконано двовибіркову перевірку середніх між сценаріями А та В на множині Монте-Карло прогонів.

Для показників T_{delay} , P_{over} , $T_{transfer}$ і R_{stable} отримано $p < 0.01$, тобто різниця між сценаріями статистично значуща на рівні 99%. Для $T_{freight}$ і E також зафіксовано значущу перевагу запропонованого підходу ($p < 0.05$). Таким чином, зафіксовані покращення не є артефактом окремої реалізації збурень.

Інтерпретація практичних ефектів. Отримані результати мають безпосередню прикладну цінність для операторів мультимодальних вузлів:

1. зменшення часу пересадки й затримок покращує користувацький сервіс і знижує ризик «ланцюгових» запізнь у суміжних транспортних системах.
2. стабілізація вантажного контуру означає меншу варіативність часу обробки та кращу передбачуваність логістичних операцій.
3. підвищення стійкості до комбінованих збурень підсилює готовність вузла до пікових навантажень і локальних інцидентів без суттєвого нарощування інфраструктурних ресурсів.

Проміжний висновок розділу. Обчислювальний експеримент підтвердив, що інтеграція прогнозу, багатокритеріальної оптимізації та сценарної перевірки в контурі цифрового двійника забезпечує системно кращі результати порівняно з правилним керуванням. Найбільш виражений ефект спостерігається саме в режимах підвищеної невизначеності, де критичною є швидкість і якість адаптивного перерозподілу ресурсів між пасажирськими та вантажними процесами.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати підтверджують, що перехід від правилного до сценарно-адаптивного керування в контурі цифрового двійника дає системний ефект для мультимодального вузла. Найбільш значущі покращення зафіксовано за показниками затримок, частки перевантажених зон та

стійкості до комбінованих збурень. Це узгоджується з логікою проактивного керування: рішення формуються не лише за поточним станом, а з урахуванням короткострокового прогнозу та наслідків альтернативних дій. Запропоновано інтегровану постановку керування мультимодальним вузлом, у якій пасажирський і вантажний контури описуються в єдиному оптимізаційному циклі, а не як ізольовані підсистеми. Розвинено сценарно-адаптивний механізм вибору дій, що поєднує багатокритеріальну оцінку з робастною поправкою ризику (через CVaR), що дозволяє відсікати рішення, нестійкі в несприятливих сценаріях.

Обґрунтовано практичну область компромісних ваг цільової функції, за якої зберігається одночасний приріст ключових метрик сервісу, пропускної спроможності та надійності. Показано роль контуру якості даних у цифровому двійнику як окремого фактору ефективності керування в реальному часі. Дослідження є таким, що комплексно у межах одного експериментального контуру враховано пасажирські, вантажні, інфраструктурні та сервісні показники. Враховано роботу в умовах невизначеності, а ефективність перевірено не лише на базовому сценарії, а й під стрес-навантаженням із комбінованими збуреннями. Дослідження має значну практичну орієнтацію й отримані індикатори (затримки, час пересадки, стабільність, відхилення слотів) безпосередньо інтерпретуються в диспетчерській практиці. Проведений експеримент має характеристики відтворюваності. Модель апробовано на тестовому полігоні; для повної зовнішньої валідації необхідне впровадження на реальному вузлі з історичними операційними даними.

Перспективи подальших досліджень це перехід від офлайн-імітації до пілотного режиму *hardware-in-the-loop* із підключенням реальних поточкових даних вузла.

Загалом результати роботи свідчать, що запропонований підхід є методично обґрунтованою основою для створення диспетчерського інструменту нового покоління. Водночас подальший розвиток має бути спрямований на зовнішню валідацію, економічне обґрунтування та масштабування з одиничного вузла до мережевого рівня.

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності оперативного керування мультимодальним транспортним вузлом за рахунок використання цифрового двійника. Запропонований підхід об'єднує моніторинг поточного стану, короткострокове прогнозування, сценарну перевірку альтернатив і багатокритеріальний вибір керуючих дій у єдиному контурі реального часу. На відміну від традиційного керування, це дало змогу перейти від реактивної до проактивної логіки прийняття рішень.

За результатами обчислювального експерименту встановлено, що застосування сценарно-адаптивної багатокритеріальної оптимізації в контурі цифрового двійника забезпечує стійке покращення ключових показників функціонування вузла. У порівнянні з базовим сценарієм отримано зниження середніх затримок, скорочення частки перевантажених зон, зменшення часу пересадки пасажирів і тривалості вантажної обробки, а також зростання індексу стабільності виконання. Додатково у стрес-сценарії з комбінованими збуреннями підтверджено дієвість підходу: пікове навантаження інфраструктури було нижчим, а повернення системи до штатного режиму — швидшим.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Smart cities of the future / M. Batty, K. Axhausen, F. Giannotti et al. *European Physical Journal Special Topics*. 2023. Vol. 232, No. 4. P. 755–774.
2. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 120952–120971.
3. A proactive event-driven digital twin architecture for logistics and transport operations / A. Bousdekis, B. Magoutas, D. Apostolou, G. Mentzas. *Information Systems*. 2023. Vol. 116. Art. 102212.
4. Data-driven adaptive control for urban transport hubs based on digital twins / S. Wang, N. Zheng, Z. Sun, Y. Liu. *Transportation Research Part C*. 2024. Vol. 161. Art. 104575.
5. Spatio-temporal graph hierarchical learning framework for metro passenger flow prediction across stations and lines / H. Li, W. Fu, H. Zhang et al. *Knowledge-Based Systems*. 2025. Vol. 311. Art. 113132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.1>.
6. STKGformer: A spatio-temporal knowledge graph enhanced transformer for passenger flow prediction / Z. Ji, Z. Hu, S. Chang, W. Zhang. *Information Sciences*. 2026. Vol. 735. Art. 123055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.123055>.
7. Cats O., Yap M., van Oort N. Transfer reliability and service robustness in multimodal passenger systems. *Transport Reviews*. 2023. Vol. 43, No. 5. P. 601–624.

8. Brintrup A., McFarlane D., Giannakis M. Digital twins in logistics and supply chain systems: A review and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 189. Art. 109768.
9. Li J., Chang D., Wen F. Digital twin enhanced rescheduling based on hybrid strategy in intermodal container terminal. *Computers & Operations Research*. 2025. Vol. 180. Art. 107053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107053>.
10. Port digitalization and terminal performance: Implications for real-time operations / M. Acciaro, C. Sys, C. Ferrari et al. *Maritime Policy & Management*. 2024. Vol. 51, No. 3. P. 289–307.
11. Hub seaport multimodal freight transport network design: Perspective of regional integration development / J. Yin, L. Zhang, X. Song et al. *Ocean & Coastal Management*. 2023. Vol. 242. Art. 106675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoam.2023.106675>.
12. Resilience evaluation and improvement of post-disaster multimodal transportation networks / W. Ma, S. Lin, Y. Ci, R. Li. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024. Vol. 189. Art. 104243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104243>.
13. A survey of multi-modal urban transportation network resilience: Modeling, evaluation, and optimization / X. Chen, L. Wang, Y. Zhang et al. *Transportation Research Part E*. 2026. Vol. 183. Art. 104634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104634>.
14. Robust optimization of multimodal transportation route selection based on multiple uncertainties / B. Yan, J. Zhang, H. Wang et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 1. Art. 5508. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17125508>.
15. Energy-efficient multimodal mobility networks in transportation digital twins: Strategies and optimization / W. Li, B. Wang, R. Sun et al. *Energy*. 2025. Vol. 318. Art. 134587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134587>.
16. Formalizing sustainable urban mobility management: An innovative approach with digital twin and integrated modeling / A. Grotto, P. Piali, G. Marrone et al. *Logistics*. 2024. Vol. 8, No. 4. Art. 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8040117>.
17. Leveraging digital twin technology for sustainable and efficient public transportation / B. Manandhar, K. D. Vance, D. B. Rawat, N. Yilmaz. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 6. Art. 2942. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15062942>.
18. Data quality governance for digital twin ecosystems / A. Bousdekis, B. Magoutas, D. Apostolou, G. Mentzas. *Information Systems*. 2023. Vol. 116. Art. 102212.
19. Proposing a digital twin DataDOSE framework for asset management in state departments of transportation / H. Nassereddine, A. Khoshkenar, F. Maier et al. *ITcon*. 2025. Vol. 30. P. 963–988. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.039>.
20. A data-intelligence-driven digital twin framework for improving sustainability in logistics / I. Abdullahi, D. Liarokapis, H. Larijani et al. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 2. Art. 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020601>.
21. Multi-objective optimization for multimodal transportation routing problem with stochastic transportation time based on data-driven approaches / Y. Peng, S. H. Gao, D. Yu et al. *RAIRO – Operations Research*. 2023. Vol. 57, No. 4. P. 2145–2165. DOI: <https://doi.org/10.1051/ro/2023090>.
22. The multi-objective shortest path problem with multimodal transportation for emergency logistics / J. Guo, H. Liu, T. Liu et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 17. Art. 2615. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12172615>.
23. Solving the robust shortest path problem with multimodal transportation / S. He, Z. Liu, W. Zhang et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 19. Art. 2978. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192978>.
24. Redesigning large-scale multimodal transit networks with shared autonomous mobility services / M. W. Ng, S. Travis Waller, J. Sun, T. H. Kim. *Transportation Research Part C*. 2024. Vol. 168. Art. 104575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104575>.

Dolia, K. Digital twin of a multimodal transport hub for adaptive management of passenger and freight flows in real time.

The article investigates improving the efficiency of operational management of a multimodal transport hub under variable demand, competition between passenger and freight flows for shared resources, and random disturbances. The aim of the study is to develop a conceptual and methodological framework for a digital twin that supports real-time dispatching decisions through a combination of monitoring, short-term forecasting, scenario testing, and multi-criteria optimization. An integrated hub-state model is proposed, accounting for demand, infrastructure saturation, transfer time, cargo-handling duration, and data quality.

Within the control loop, actions are selected by minimizing weighted losses with robust risk adjustment, which makes it possible to filter out unstable decisions. For verification, a computational experiment was conducted on a test hub in two modes: baseline rule-based control and scenario-adaptive control within the digital twin loop. The results demonstrate improvements in key indicators, including lower average delays, a smaller share of congested zones, shorter transfer and cargo-handling times, and a higher stability index. Under a stress scenario, the approach showed stronger robustness, with lower peak overloads and faster recovery to normal operation. The practical value lies in supporting dispatcher decisions and phased integration into existing urban transport monitoring platforms. The findings confirm that controlling telemetric data quality and coordinating information flows are critical for forecast accuracy, recommendation reliability, and dispatcher support during peak loads and uncertainty.

Key words: digital twin, multimodal transport hub, adaptive control, passenger flows, freight flows, multi-criteria optimization, efficiency, dispatching decisions, real-time operation.

ДОЛЯ Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", e-mail: k.v.dolia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4693-9158>

Kostiantyn DOLIA, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cars and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", e-mail: k.v.dolia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4693-9158>

Дата надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

<https://doi.org/10.36910/emwxn052>

Захарчук В.І., Захарчук О.В., Скалига М.М., Ципящук А.Л.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕОБЛАДНАНОГО З ДИЗЕЛЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА НА ПРОПАН-БУТАНІ

Газові двигуни є перспективним напрямом розвитку сучасного транспорту завдяки поєднанню високої екологічності та економічної доцільності їх використання. Газові палива забезпечують більш повне й рівномірне згоряння, що сприяє зниженню викидів шкідливих речовин, покращенню робочих характеристик двигуна, зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню ресурсу силових агрегатів. Пропан-бутан має ряд переваг перед природним газом у разі його використання в автомобільній техніці. Аналіз його фізико-хімічних властивостей засвідчив високі значення теплоти згоряння як самого палива, так і паливо-повітряної суміші, а октанове число незначно менше, ніж у природного газу. Виконано переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані за тією ж технологією, що і для роботи на природному газі. Але ступінь стиску двигуна зменшили до 11 одиниць. Стендові випробування переобладнаного з дизеля газового двигуна на пропан-бутані засвідчили його роботоздатність. Потужність газового двигуна на рівні базового дизеля. Годинна витрата палива є дещо більшою внаслідок роботи газового двигуна на більш багатих паливоповітряних сумішах. Викиди оксиду вуглецю і вуглеводнів газового двигуна є дещо більшими, але в його відпрацьованих газах відсутня сажа. Тому сумарна токсичність відпрацьованих газів газового двигуна буде меншою, ніж у дизеля. При переході на газове паливо затрати на паливо-мастильні матеріали зменшуються майже у два рази. Термін окупності інвестицій на конвертацію складає від 9 до 16 місяців. За даних умов автотракторну техніку більш доцільно переобладнувати для роботи на пропан-бутані, оскільки його ціна менша у порівнянні з природним газом і витрати на переобладнання також менші, відсутнє зменшення корисної вантажопідйомності транспортного засобу.

Ключові слова: дизель, газовий двигун, переобладнання, пропан-бутан, газове паливо, витрата палива, екологічні показники

ВСТУП

Газові двигуни є екологічно чистими системами з меншими викидами забруднюючих речовин у повітря, ніж звичайні бензинові та дизельні двигуни. Скраплений нафтовий газ, паливо з низьким вмістом вуглецю, характеризується низьким рівнем викидів під час спалювання. Це паливо дешевше, ніж дизельне паливо, що зменшує витрати на експлуатацію. Крім того, можна зменшити витрати на технічне обслуговування, оскільки всередині двигунів на зрідженому газі накопичується менше нагару. Оскільки скраплений газ використовувався як автомобільне паливо протягом десятиліть, було підтверджено, що він має додаткові переваги щодо сумісності обладнання та інфраструктури порівняно з новими екологічними видами палива, які зараз розробляються. Таким чином, газові двигуни можуть бути використані для заміни та модернізації застарілих дизельних двигунів у важких вантажівках і будівельній техніці. Однак попередні дослідження обмежувалися лише порівнянням викидів вихлопних газів дизельних і газових двигунів. У цьому дослідженні порівнювалися викиди вихлопних газів і продуктивність цих двигунів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

За прогнозами, у 2026 році споживання викопного палива зросте приблизно на 1,4 мільйона барелів на день [1], а двигуни із запалюванням від стиснення визнані однією з головних причин забруднення повітря [2]. Альтернативні джерела палива мають вирішальне значення для задоволення цього зростання потреби в енергії [3] і для зменшення шкоди навколишньому середовищу, спричиненої викопним паливом. У цьому дослідженні пропан-бутан є життєздатною заміною в двигунах із запалюванням від стиснення [4]. З економічної точки зору, пропан-бутан є майже таким же привабливим, як рідкий природний газ (ПГ) як джерело енергії [5] для зменшення викидів вуглецю, оскільки він пропонує коротші періоди окупності, зменшує інвестиційні витрати [6] і менш вразливий до змін цін на паливо [7]. Крім того, пропан-бутан не виділяє забруднювачів у разі витоків, на відміну від існуючих нафтопродуктів, таких як дизельне паливо [8], і має аналогічні переваги щодо викидів ПГ. Використання пропану-бутану покращує процес горіння [9] і зменшує викиди твердих частинок і сажі, що призводить до низьких викидів CO і CH [10]. У дизельних двигунах пропан-бутан має більший крутний момент і термічний ККД через його більшу теплотворну здатність [11]. Це також допомагає зменшити викиди NO_x шляхом зниження температури згоряння [12]. Теплотворна здатність пропану висока, але його стійкість до детонації низька. Для надійного запалювання можна використовувати іскрове запалювання, оскільки цетанове число для пропану-

бутану відносно низьке [13]. Використання пропану-бутану з методами прямого впорскування мотивується адаптацією безпосереднього впорскування та перевагами інтеграції з іскровим запалюванням з точки зору продуктивності в циліндрі. Через ці обставини необхідно застосувати таку техніку згоряння, щоб досягти високої продуктивності та низького рівня забруднюючих речовин у переобладнаному з дизеля газовому двигуні, що працює на пропані-бутані.

Переобладнання бензинового або дизельного транспортного засобу для роботи на зрідженому нафтовому газі (ЗНГ) часто є більш доступним, ніж переведення його на стиснений ПГ (СПГ). Комплекти для переобладнання транспортних засобів, що працюють на ЗНГ, як правило, дешевші через простішу технологію та процеси встановлення. ЗНГ дешевший, ніж бензин, дизельне паливо і ПГ. Вартість ЗНГ за літр зазвичай нижча, ніж СПГ за метр кубічний, що робить його економічно вигідним.

ЗНГ має вищу густину енергії порівняно з СПГ. Це означає, що при тому самому обсязі ЗНГ містить більше енергії, забезпечуючи кращу паливну ефективність. Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, можуть проїжджати більші відстані порівняно з транспортними засобами на СПГ з тією ж ємністю балонів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження показників переобладнаного з дизеля газового двигуна з іскровим запалюванням.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні **завдання**:

- оцінка роботоздатності переобладнаного з дизеля газового двигуна при його роботі на пропан-бутановій суміші;
- визначення енергетичних, паливо-економічних та екологічних показників газового двигуна.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Фізико-хімічні властивості газових палив наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники моторних палив

Показник	Паливо			
	Природний газ	Пропан	Бутан	Дизельне паливо (для порівняння)
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	48,7	45,7	45,4	42,5
Нижча теплота згоряння паливоповітряної суміші при певному значенні коефіцієнта надлишку повітря, МДж/м ³	3,11 (при $\alpha=1,0$)	3,46 (при $\alpha=1,0$)	3,41 (при $\alpha=1,0$)	3,2 (при $\alpha=1,2$)
Октанове число	110...130	105	94	-

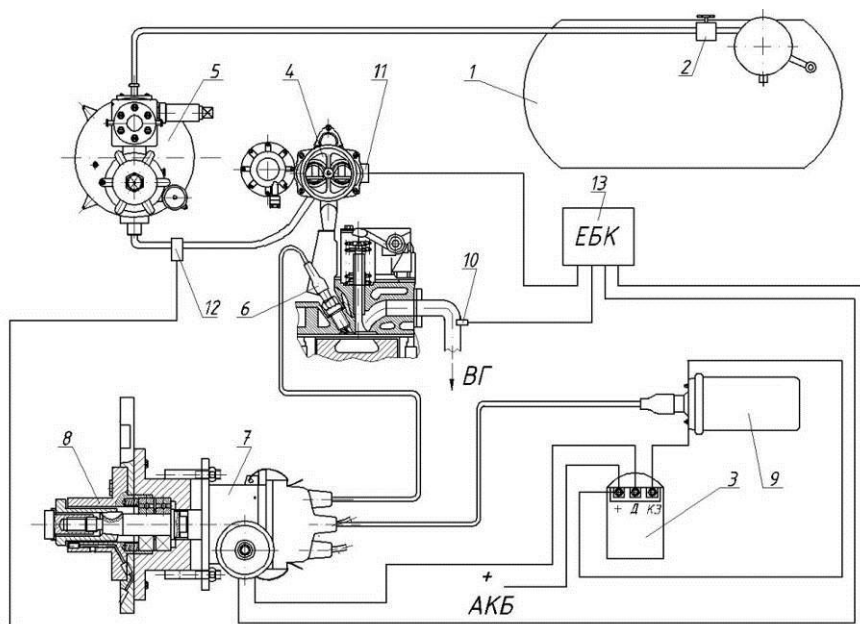
З таблиці 1 видно, що основні показники пропан-бутану є прийнятними для його використання в якості моторного палива в переобладнаних з дизелів газових двигунах з іскровим запалюванням. Але октанове число пропан-бутанових сумішей менше, ніж СПГ.

В умовах лабораторії двигунів внутрішнього згоряння ЛНТУ здійснено переобладнання дизеля Д-243, встановленого на випробувальному стенді, в газовий двигун з іскровим запалюванням [14] за схемою, зображеною на рис. 1. Було демонтовано дизельну паливну апаратуру і замість неї встановлено електронну безконтактну систему запалювання. Замість форсунок встановлені свічки запалювання, замість паливного насоса високого тиску встановлений переривач-розподільник. Встановлена газова паливна апаратура: газовий редуктор та газоповітряний змішувач. Змішувач встановлений на заново виготовленому впускному колекторі. Ступінь стиску двигуна було зменшено з 16 до 11 одиниць відповідно до октанового числа пропан-бутану. Виконано регулювання двигуна, зокрема встановлений оптимальний кут випередження запалювання та відрегульований склад газоповітряної суміші.

В результаті стендових випробувань отримані навантажувальні характеристики двигуна з заміром токсичності відпрацьованих газів (рис. 2).

Аналіз кривих характеристики показує, що вміст оксиду вуглецю CO у відпрацьованих газах газового двигуна на режимах малих та середніх навантажень практично такий же, як у дизеля. На режимах великих навантажень (при потужності двигуна більше 25 кВт) вміст CO незначно більший у газового двигуна (до 0,5 %). Концентрація вуглеводнів у відпрацьованих газах газового двигуна на

режимах малих і середніх навантажень до 180 млн^{-1} більша у порівнянні з дизелем. На режимах великих навантажень вміст вуглеводнів менший. У відпрацьованих газах газового двигуна відсутня сажа, в дизеля її вміст досить значний.



1 – балон; 2 – магістральний вентиль; 3 – комутатор; 4 – газоповітряний змішувач; 5 – газовий редуктор; 6 – свічка запалювання; 7 – перемикач-розподільник; 8 – привід перемикача-розподільника; 9 – котушка запалювання; 10 – датчик вільного кисню; 11 – датчик положення дросельної заслінки; 12 – кроковий дозатор; 13 – електронний блок керування

Рисунок 1 – Об'єднана схема систем запалювання і живлення газового двигуна

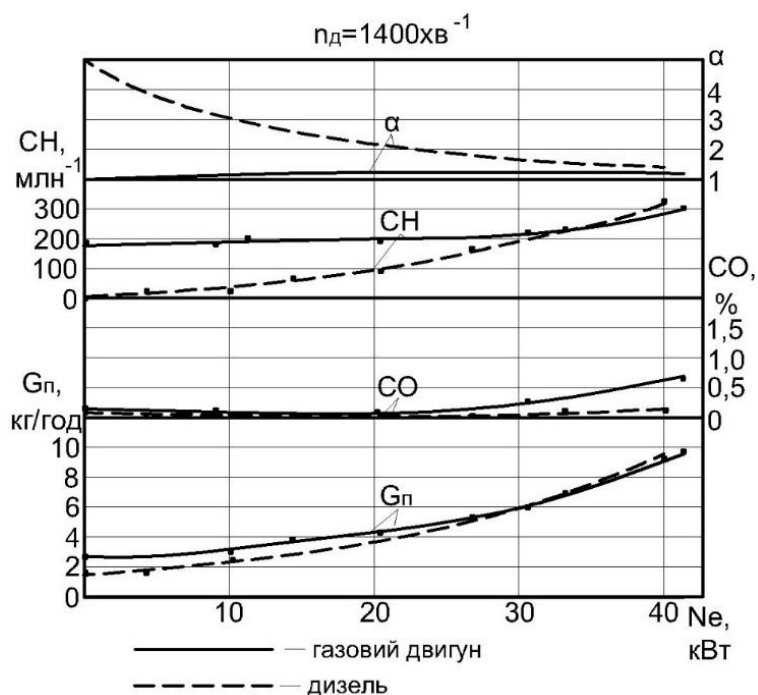


Рисунок 2 – Навантажувальна характеристика двигуна з заміром викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами

Потужність газового двигуна при 1400 хв^{-1} збільшилась з 40 кВт до 41,5 кВт, що можна пояснити хорошими енергетичними показниками пропан-бутану. Годинна витрата палива газового двигуна на режимах малих і середніх навантажень більша в межах 1 кг/год , що можна пояснити роботою двигуна на більш багатих сумішах. На режимах великих навантажень витрата газу практично рівна витраті дизельного палива.

Зовнішня швидкісна характеристика газового двигуна підтвердила його хороші енергетичні показники (рис. 3).

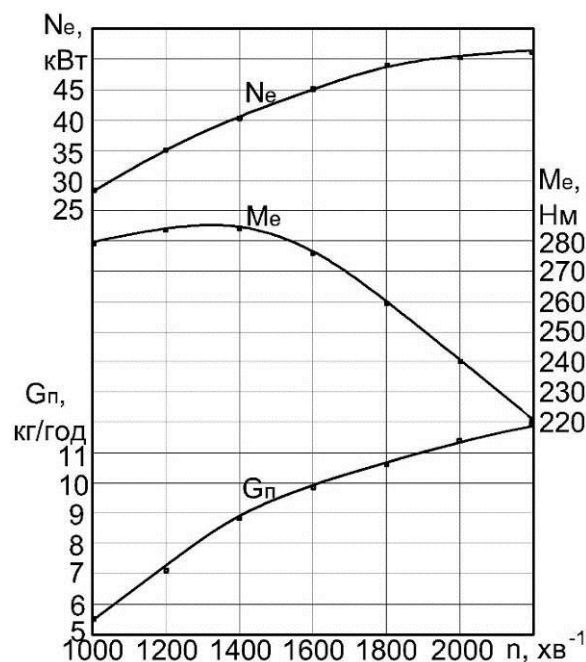


Рисунок 3 – Зовнішня швидкісна характеристика газового двигуна Д-243Г

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, як правило, споживають менше палива, ніж їх аналоги на СПГ, щоб подолати ту саму відстань. Оскільки ЗНГ зберігається в рідкому вигляді, він забезпечує більш послідовний і ефективний процес згоряння порівняно з СПГ, який знаходиться в газоподібному стані.

ЗНГ зберігається у вигляді рідини під помірним тиском, що означає, що резервуари для зберігання можуть бути меншими та компактнішими, ніж резервуари для СПГ. Це дозволяє краще керувати простором в автомобілі, звільняючи більше місця для вантажу або пасажирів.

Вища густина енергії ЗНГ в поєднанні з його рідкою формою дозволяє транспортним засобам, що працюють на газовому паливі, долати більшу відстань перед заправкою порівняно з транспортними засобами, що працюють на СПГ. Це робить ЗНГ ідеальним варіантом для подорожей на далекі відстані, особливо в районах з обмеженою кількістю заправних станцій.

ЗНГ згоряє більш рівномірно, ніж СПГ. Це забезпечує більш плавну роботу двигуна, зменшуючи спрацювання компонентів двигуна. Двигуни на ЗНГ, як правило, працюють тихіше та з меншою вібрацією порівняно з двигунами на СПГ.

Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, зазвичай відчувають менші втрати потужності порівняно з тими, що працюють на СПГ. Це особливо помітно у більш важких транспортних засобах або тих, що їздять у горбистих або гірських регіонах, де вихідна потужність є критичною для продуктивності.

Потребують окремих досліджень питання забезпечення надійного запуску газового двигуна в холодну пору та роботи в режимі холостого ходу, а також обмеження максимальної частоти обертання.

ВИСНОВКИ

Для проведення експериментальних досліджень проведено переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані шляхом зменшення ступеня стискування до $\varepsilon = 11$ і встановлення елементів систем запалювання і живлення ЗНГ.

Результати експериментальних досліджень показали, що переобладнаний з дизеля газовий двигун є роботоздатним у всьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів. Його ефективна потужність близька до потужності базового дизеля, годинна витрата палива більша, ніж у дизеля в межах 1 кг/год.

Викиди окремих шкідливих речовин на деяких режимах роботи газового двигуна є більшими, ніж у дизеля, але сумарна токсичність відпрацьованих газів менша через відсутність в них сажі.

Аналіз отриманих результатів говорить про доцільність конвертації дизельних двигунів в газові. Високі енергетичні показники в газових двигунах, конвертованих з дизелів, отримуються

завдяки можливості реалізації великих значень ступені стиску. При переході на газ затрати на паливо-мастильні матеріали зменшуються майже у два рази. Термін окупності інвестицій на конвертацію складає від 9 до 16 місяців.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. U.S. Energy Information Administration. Short-Term Energy Outlook. URL: https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php (дата звернення: 27.04.2023).
2. Fayyazbakhsh A., Bell M. L., Zhu X., Mei X., Koutný M., Hajinajaf N. та ін. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 376. Article 134260. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.134260.
3. Islam Rony Z., Mofijur M., Hasan M. M., Rasul M. G., Jahirul M. I., Forruque Ahmed S. та ін. Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*. 2023. Vol. 338. Article 127220. DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.127220.
4. Arslan E., Kahraman N. Comparison of natural gas and propane addition to combustion air in terms of engine performance in compression ignition engine. *Fuel*. 2022. Vol. 312. Article 122952. DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.122952.
5. Lindstad E., Lagemann B., Rialland A., Gamlem G. M., Valland A. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 101. Article 103075. DOI: 10.1016/J.TRD.2021.103075.
6. Yeo S. J., Kim J., Lee W. J. Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 330. Article 129955. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129955.
7. Gore K., Rigot-Müller P., Coughlan J. Cost assessment of alternative fuels for maritime transportation in Ireland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 110. Article 103416. DOI: 10.1016/J.TRD.2022.103416.
8. Livaniou S., Papadopoulos G. A. Liquefied Natural Gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article 16364. DOI: 10.3390/SU142416364.
9. Baek S., Lee S., Shin M., Lee J., Lee K. Analysis of combustion and exhaust characteristics according to changes in the propane content of LPG. *Energy*. 2022. Vol. 239. Article 122297. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.122297.
10. Simsek S., Uslu S., Simsek H., Uslu G. Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition engine running on gasoline-LPG blends. *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 221. Article 106947. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2021.106947.
11. Aydin M., Irgin A., Çelik M. B. The impact of diesel/LPG dual fuel on performance and emissions in a single cylinder diesel generator. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8. No. 5. P. 1–14. DOI: 10.3390/app8050825.
12. Lee J., Choi S., Kim G., Kim D., Lee S., Lee S. та ін. A study of emissions reduction through dual-fuel combustion with propane in a compression ignition engine. *SAE Technical Papers*. 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2669.
13. Kapusta Ł. J., Bachanek J., Jiang C., Piaszyk J., Xu H., Wyszynski M. L. Liquid propane injection in flash-boiling conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article 6257. DOI: 10.3390/EN14196257.
14. Захарчук В. І., Захарчук О. В., Швабюк В. В., Ярошук В. В. Переобладнання дизеля для роботи на пропан-бутані. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. – 2025. № 1 (24). С. 209–215.

REFERENCES

1. U.S. Energy Information Administration. (n.d.). Short-term energy outlook. Retrieved April 27, 2023, from https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php
2. Fayyazbakhsh, A., Bell, M. L., Zhu, X., Mei, X., Koutný, M., Hajinajaf, N., et al. (2022). Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134260>
3. Islam Rony, Z., Mofijur, M., Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., Forruque Ahmed, S., et al. (2023). Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*, 338, 127220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127220>

4. Arslan, E., & Kahraman, N. (2022). Comparison of natural gas and propane addition to combustion air in terms of engine performance in compression ignition engine. *Fuel*, 312, 122952. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122952>
5. Lindstad, E., Lagemann, B., Rialland, A., Gamlem, G. M., & Valland, A. (2021). Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of e-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
6. Yeo, S. J., Kim, J., & Lee, W. J. (2022). Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129955>
7. Gore, K., Rigot-Müller, P., & Coughlan, J. (2022). Cost assessment of alternative fuels for maritime transportation in Ireland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 110, 103416. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103416>
8. Livaniou, S., & Papadopoulos, G. A. (2022). Liquefied natural gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation. *Sustainability*, 14, 16364. <https://doi.org/10.3390/su142416364>
9. Baek, S., Lee, S., Shin, M., Lee, J., & Lee, K. (2022). Analysis of combustion and exhaust characteristics according to changes in the propane content of LPG. *Energy*, 239, 122297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122297>
10. Simsek, S., Uslu, S., Simsek, H., & Uslu, G. (2021). Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition engine running on gasoline–LPG blends. *Fuel Processing Technology*, 221, 106947. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106947>
11. Aydin, M., Irgin, A., & Çelik, M. B. (2018). The impact of diesel/LPG dual fuel on performance and emissions in a single cylinder diesel generator. *Applied Sciences*, 8(5), 825. <https://doi.org/10.3390/app8050825>
12. Lee, J., Choi, S., Kim, G., Kim, D., Lee, S., Lee, S., et al. (2013). A study of emissions reduction through dual-fuel combustion with propane in a compression ignition engine. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2669>
13. Kapusta, Ł. J., Bachanek, J., Jiang, C., Piaszyk, J., Xu, H., & Wyszynski, M. L. (2021). Liquid propane injection in flash-boiling conditions. *Energies*, 14, 6257. <https://doi.org/10.3390/en14196257>
14. Zakharchuk, V.I., Zakharchuk, O.V., Shvabiuk, V.V., & Yaroshchuk, V.V. (2025). Pereobladnannia dyzelia dlia roboty na propan–butani. Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti, 1(24), 209–215.

V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, M. Skalyga, A. Tsypiashchuk. Research of a Diesel-to-Gas Converted Engine Operating on Propane–Butane

Gas engines represent a promising direction in the development of modern transport due to the combination of high environmental performance and economic feasibility of their use. Gaseous fuels provide more complete and uniform combustion, which contributes to the reduction of harmful emissions, improvement of engine performance characteristics, decrease in operating costs, and extension of the service life of power units. Propane–butane has a number of advantages over natural gas when used in automotive applications. An analysis of its physicochemical properties indicates high values of the calorific value both of the fuel itself and of the fuel–air mixture, while its octane number is only slightly lower than that of natural gas. The D-243 diesel engine was converted into a spark-ignition gas engine designed to operate on propane–butane using the same technology as for natural gas conversion. However, the compression ratio was reduced to 11. Bench tests of the converted gas engine confirmed its operability. The power output of the gas engine remains at the level of the base diesel engine, while the hourly fuel consumption is slightly higher due to operation with richer air–fuel mixtures. Emissions of carbon monoxide and hydrocarbons are somewhat higher; however, soot is absent in the exhaust gases. Therefore, the overall toxicity of the exhaust gases of the gas engine is lower compared to that of the diesel engine. When switching to gaseous fuel, the costs of fuel and lubricants are reduced by nearly two times. The payback period for the conversion ranges from 9 to 16 months. Under these conditions, it is more advisable to convert automotive and agricultural machinery to operate on propane–butane, as its cost is lower compared to natural gas, the conversion expenses are also lower, and there is no reduction in the vehicle's payload capacity.

Keywords: diesel engine, gas engine, conversion, propane–butane, gaseous fuel, fuel consumption, environmental performance.

ЗАХАРЧУК Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

ЗАХАРЧУК Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>

СКАЛИГА Микола Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: cnn110162@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1852-078X>

ЦИПЯЩУК Андрій Лукич, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

Victor ZAKHARCHUK, Doctor of Science in Engineering, Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

Oleg ZAKHARCHUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>.

Mykola SKALIGA, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: cnn110162@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1852-078X>

Andrii TSYPYASHCHUK, postgraduate of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

Дата надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

<https://doi.org/10.36910/debvys76>

Кашканов А. А., Кашканов В. А., Варчук В. В., Дмитрієва А. В., Москалюк М. Л.
Вінницький національний технічний університет

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ІНФРАСТРУКТУРИ РИНКУ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ НА ШАСІ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ У ВІННИЦЬКОМУ РЕГІОНІ

У статті здійснено комплексний аналіз інфраструктури ринку сервісних послуг спеціалізованого рухомого складу на шасі вантажних автомобілів у Вінницькому регіоні. Дослідження базується на системному підході до оцінювання сервісного потенціалу та виявлення структурних дисбалансів у його розвитку. Авторами розроблено морфологічну матрицю сервісних можливостей, яка засвідчила значну асиметрію: при високій насиченості ринку вживаною технікою (понад 90%) та розгалуженою мережею паливних хабів (близько 85%), спостерігається дефіцит високотехнологічних логістичних вузлів типу «сухих портів» та спеціалізованої рекреаційної інфраструктури для персоналу транспортних засобів (лише 35–40%). Обґрунтовано необхідність юридичної стандартизації сервісу надбудов відповідно до класифікації КВЕД 33.12, що забезпечить прозорість ринку та підвищить рівень його інтеграції у міжнародні стандарти. Запропоновано інноваційні моделі модернізації інфраструктури, які ґрунтуються на використанні Uber-моделі виїзного сервісу, технологій доповненої реальності для діагностики та навчання персоналу, а також концепції прогностичного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Визначено стратегічні напрями децентралізації сервісних потужностей, розвитку мультимодальних логістичних центрів та інтеграції регіональної інфраструктури у європейський транспортний простір. Практичне значення дослідження полягає у формуванні методологічних засад для оптимізації сервісного ринку, підвищення ефективності використання рухомого складу та забезпечення конкурентоспроможності транспортної системи Вінницької області.

Ключові слова: спеціалізований рухомий склад, сервісна інфраструктура, технічна експлуатація, логістика запчастин, цифровізація, прогностичне технічне обслуговування, технології доповненої реальності

ВСТУП

Ефективне функціонування транспортної системи України в умовах воєнного стану та процесів європейської інтеграції критично залежить від рівня сервісного забезпечення парку спеціалізованого рухомого складу (СРС) [1]. Вінницький регіон, який виступає потужним аграрно-індустріальним вузлом із перетином ключових магістралей, демонструє стабільне зростання потреби у використанні складної техніки на шасі вантажних автомобілів. До складу такого рухомого складу входять як традиційні самоскиди, автокрани та паливозаправники, так і високотехнологічні рефрижератори, комунальні машини та інші спеціалізовані надбудови, що забезпечують безперебійність логістичних процесів у регіоні. Стрімке технологічне ускладнення надбудов та перехід базових шасі на екологічні стандарти «Еуро-5/Еуро-6» створили значний розрив між технічним рівнем сучасного СРС та реальною спроможністю існуючої сервісної інфраструктури. Проблема посилюється децентралізацією сервісних потужностей, фрагментарністю їх розташування та дефіцитом вузькопрофільних спеціалістів, здатних здійснювати комплексне обслуговування як базового шасі, так і специфічного навісного обладнання. У результаті виникають ризики тривалих простоїв спецтехніки, що призводить до економічних втрат та зниження ефективності транспортної системи регіону [2, 3].

У цьому контексті аналіз стану та стратегічне планування розвитку сервісної мережі у Вінницькому регіоні набувають особливої актуальності. Вони є необхідною передумовою для забезпечення безперебійної логістики, підвищення рівня технічної готовності спеціалізованого рухомого складу та інтеграції регіональної транспортної інфраструктури у європейський простір. Вирішення зазначених проблем потребує комплексного підходу, що поєднує інституційні, технологічні та кадрові аспекти, а також впровадження інноваційних моделей сервісного обслуговування, здатних забезпечити стійкість та конкурентоспроможність транспортної системи Вінниччини в умовах сучасних викликів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зростання обсягів вантажоперевезень у регіонах України, зокрема у Вінницькій області, супроводжується посиленням вимог до сервісної інфраструктури та виробничих потужностей транспортних підприємств. У сучасних дослідженнях українських науковців наголошується на системних проблемах транспортної галузі. Зокрема, Комчатних О.В., Петровська С.І. та Редько Н.О.

[4] підкреслюють, що розвиток транспортної інфраструктури стримується критичною нестачею виробничих потужностей та недостатнім рівнем інвестицій, що ускладнює модернізацію галузі. Осадчий М.Л. [5] акцентує увагу на стратегічних пріоритетах, вказуючи на потребу у масштабних фінансових вкладеннях для адаптації підприємств до європейських стандартів. Дослідження Субочева О.І., Мартинюка В.В. та Січка О.Є. [6] деталізують проблему на рівні сервісних підприємств, де виробничі потужності залишаються недовантаженими через низьку клієнтську активність та слабку інтеграцію сучасних технологічних рішень. Подібні висновки підтверджуються міжнародними дослідженнями, індексованими у Scopus. Наприклад, у статті Katsaliaki, K., Galetsi, P. & Kumar, S. [7] зроблено огляд літератури щодо порушень у ланцюгах постачання та зазначено важливість адаптації транспортних систем і сервісної інфраструктури для забезпечення стійкості перевезень.

Надич Т.М., Аулін В.В., Гриньків А.В. та Слонь В.В. [8] констатують відсутність інтегрованого підходу до управління сервісним обслуговуванням вантажних автомобілів, що ускладнює ефективну організацію технічної експлуатації. Подібні висновки узгоджуються з міжнародними оглядами, зокрема у дослідженні Hosseini Shekarabi S., Kiani Mavi R. & Romero Macau F. [9], де підкреслюється, що застосування цифрових платформ для управління даними про технічний стан рухомого складу та логістичні процеси дозволяє підвищити надійність транспортних систем і скоротити витрати на їх обслуговування.

У світовій практиці, за даними публікації Mahale Y., Kolhar S. & More A.S. [10], активно впроваджуються методи сенсорної діагностики та алгоритми штучного інтелекту для прогнозування відмов, що забезпечує скорочення часу простою техніки та підвищення точності обслуговування. Аналогічні тенденції простежуються й в Україні: дослідження науковців з Львівської політехніки демонструють ефективність AI-керованої діагностики у військовій [11] та аграрній техніці [12], а роботи вінницьких [13, 14], харківських та хмельницьких науковців [15] розкривають потенціал штучного інтелекту для управління перевезеннями в транспортних системах. Це свідчить про інтеграцію українських науковців у глобальний дискурс щодо прогнозного технічного обслуговування, де поєднання сенсорних технологій, телеметрії та алгоритмів машинного навчання формує нову парадигму підвищення надійності та ефективності транспортних засобів.

Попри значну увагу до загальнонаціональних та міжнародних аспектів розвитку транспортної інфраструктури, питання комплексного розвитку сервісної інфраструктури саме у Вінницькому регіоні досі залишалися поза увагою дослідників. Специфіка області як аграрного та транзитного хабу вимагає локального аналізу потужностей, оскільки існуючі загальнодержавні методики не враховують регіональну концентрацію спецтехніки та особливості місцевого ринку сервісних послуг. Це створює інформаційний вакуум, який перешкоджає ефективному плануванню розвитку технічного сервісу на місцевому рівні.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є проведення комплексного аналізу поточної інфраструктури сервісу спеціалізованого рухомого складу на шасі вантажних автомобілів у Вінницькому регіоні, виявлення критичних недоліків у системі обслуговування складних надбудов та обґрунтування пріоритетних напрямків модернізації сервісної мережі для підвищення ефективності її функціонування.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Структурно-кількісний аналіз парку спеціалізованого рухомого складу Вінниччини та ритейл-інфраструктури.
2. Аналіз сегменту технічного обслуговування і поточного ремонту вантажних шасі та надбудов.
3. Аналіз мережі АЗС у Вінницькому регіоні.
4. Дослідження розвитку термінальної інфраструктури та рекреаційних складових.
5. Аналіз інфраструктури ринку запасних частин і компонентів, перспектив цифровізації сервісно-логістичної структури СРС регіону.
6. Формування методологічних засад для оптимізації сервісного ринку, підвищення ефективності використання рухомого складу та забезпечення конкурентоспроможності транспортної системи Вінницької області.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для проведення комплексного аналізу інфраструктури ринку сервісних послуг спеціалізованого рухомого складу (СРС) на шасі вантажних автомобілів у Вінницькому регіоні використано поєднання статистичних, аналітичних та системних методів дослідження [16].

Матеріали дослідження включали:

- офіційні статистичні дані щодо кількісного та структурного складу парку СРС у Вінницькій області;
- інформацію про діяльність підприємств сервісного обслуговування вантажних автомобілів та надбудов;
- дані щодо функціонування мережі автозаправних станцій, термінальної інфраструктури та рекреаційних об'єктів;
- відомості про ринок запасних частин і компонентів, а також тенденції цифровізації сервісно-логістичних процесів.

Методи дослідження:

1. Структурно-кількісний аналіз – для визначення складу та динаміки розвитку парку СРС і відповідної інфраструктури.
2. Порівняльний аналіз – для оцінки рівня розвитку сервісних послуг у Вінницькому регіоні між районами, видами та типами підприємств, стосовно вимог стандартів тощо.
3. Системний аналіз – для виявлення взаємозв'язків між сегментами сервісної інфраструктури (технічне обслуговування, ремонт, АЗС, термінали, ринок запчастин).
4. Метод експертних оцінок – для визначення критичних недоліків у системі обслуговування складних надбудов та формування пріоритетних напрямів модернізації.
5. Аналітико-прогностичні методи – для обґрунтування перспектив цифровізації та оптимізації сервісної мережі.

Особливе місце у дослідженні займає розрахунок інтегрального коефіцієнта сервісної потужності регіону, який дозволяє оцінити Вінницьку область як єдиний сервісно-логістичний механізм. Простими словами, це показник того, наскільки інфраструктура здатна якісно надавати сервісні послуги для всього наявного парку СРС.

Для його визначення об'єднано три критичні параметри:

- кількісна потужність (загальна кількість суб'єктів сервісу);
- технологічна складність (здатність виконувати ремонт гідравлічних надбудов, електронних систем, паливної апаратури, а не лише базові операції);
- географічна доступність (рівномірність розподілу сервісних центрів по області).

Інтегральний коефіцієнт представлено як середньозважену величину

$$K_{SPR} = \alpha \cdot I_{KN} + \beta \cdot I_{TG} + \gamma \cdot I_{TR}, \quad (1)$$

де I_{KN} – індекс кількісного насичення; I_{TG} – індекс технологічної глибини; I_{TR} – індекс територіальної рівномірності; α , β , γ – вагові коефіцієнти, сума яких дорівнює 1,0. Для СРС найважливішою є технологія ($\beta = 0,5$), потім доступність ($\gamma = 0,3$) і лише потім кількість ($\alpha = 0,2$).

Застосування цього інтегрального показника дозволяє не лише оцінити поточний стан сервісної інфраструктури, але й визначити пріоритетні напрями її модернізації для підвищення ефективності використання спеціалізованого рухомого складу та конкурентоспроможності транспортної системи Вінницької області.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективність сервісної інфраструктури прямо залежить від параметрів парку, що обслуговується. Авторами проведена оцінка парку СРС на основі актуальних звітів Головного сервісного центру МВС України та показників Головного управління статистики у Вінницькій області. Враховуючи, що загальний парк вантажних автомобілів в області оцінюється приблизно у 45-50 тис. одиниць, частка саме СРС та тягачів складає близько 12-15 тис. одиниць. Структуру парку СРС станом на 2024-2025 роки подано у таблиці 1, аналіз якої показує, що понад 60% парку спеціалізованого рухомого складу зосереджено у м. Вінниці та Вінницькому районі, що логічно з огляду на концентрацію великих комунальних підприємств, будівельних компаній і торговельних мереж. Висока частка у Гайсинському та Тульчинському районах пояснюється наявністю цукрових заводів та м'ясо-молочних холдингів, які активно використовують спеціалізовані напівпричеми й цистерни. Могилів-Подільський район, попри меншу площу, вирізняється значною кількістю тягачів завдяки прикордонному розташуванню та функціонуванню митних терміналів. Віковий склад парку СРС у Вінницькому регіоні демонструє критичну диференціацію: лише 7-10% становить нова техніка агрохолдингів і великих логістичних компаній, яка потребує авторизованого сервісу; найбільш активний сегмент – машини віком 5-15 років (35-40%), що формують основний попит на мультибрендові СТО; понад половину парку складає техніка старше 15 років, яка здебільшого

ремонтуються власними силами комунальних служб і фермерських господарств. Брендів структура шасі чітко орієнтована на європейських виробників: лідерами є MAN та Scania у сегменті тягачів і спецшасі, DAF та Mercedes-Benz – у магістральних рефрижераторах і фургонах, тоді як Renault та Iveco широко представлені середньотоннажними спеціальними машинами.

Таблиця 1. Розподіл парку CPC Вінницької області за адміністративно-територіальним поділом

Адміністративна одиниця	Кількість CPC, од.	Основна спеціалізація парку
1. Місто Вінниця	5 800 - 6 200	Комунальна техніка, будівельна техніка, рефрижератори, дистрибуція, технічна допомога, автомобілі екстрених служб
2. Вінницький район	2 400 - 2 700	Будівельна техніка, автомобільні поїзди, дистрибуція, паливні цистерни, контейнеровози
3. Гайсинський район	1 500 - 1 700	Зерновози, самоскиди, автоцистерни-молоковози
4. Жмеринський район	1 100 - 1 300	Зерновози, самоскиди, паливозаправники
5. Тульчинський район	1 000 - 1 200	Харчові цистерни (молоко), рефрижератори, самоскиди
6. Могилів-Подільський	900 - 1 100	Автомобільні поїзди, самоскиди,
7. Хмільницький район	800 - 1 000	Дорожня техніка, аграрні спецмашини
Усього по області	~ 13 500 - 15 200	

Формування ринку спеціалізованого рухомого складу у Вінницькій області чітко відображає економічний профіль регіону: понад половину попиту забезпечує агропромисловий сектор із сезонною потребою в зерновозах, автоцистернах та паливозаправниках; близько чверті припадає на комунальну та дорожню сферу, де активно оновлюється парк сміттєвозів, дорожніх машин і автовишок через систему «Prozorro»; ще 15-20% складає будівельна та лісозаготівельна техніка з високими вимогами до витривалості шасі. Така структура створює «технологічні ножиці»: з одного боку, область насичена сучасною європейською технікою, що потребує комп'ютерної діагностики та спеціалізованого обладнання, а з іншого – значна частина парку перебуває в зоні критичного зносу, що формує надмірне навантаження на ремонтні зони та вимагає специфічних підходів до відновлення вузлів.

Аналіз суб'єктів господарювання у Вінницькій області (табл. 2) дозволяє виділити дві паралельні моделі формування автопарку: офіційний дилерський сектор (орієнтований на високотехнологічні тягачі та самоскиди «Еуро-6») та вторинний ринок (імпортовані спецшасі та бетонозмішувачі з напрацюванням у ЄС). У сучасних умовах Вінницького регіону продаж техніки перестав бути суто актом торгівлі, трансформувавшись у складну мультисервісну послугу за концепцією «3S» (Sales-Service-Spare parts).

Таблиця 2. Порівняльний аналіз сегментів продажу нового та бувшого у використанні CPC у Вінницькому регіоні

Характеристика	Новий CPC (дилерський сегмент)	CPC бувший у використанні (вторинний ринок / імпорт)
1. Основні типи ТЗ	Магістральні тягачі «Еуро-6», сучасні самоскиди, зерновози, спецшасі	Тягачі «Еуро-5», самоскиди (8х4, 6х4), автокрани, техніка з напрацюванням у ЄС
2. Число суб'єктів	~15–20 офіційних центрів	Більше 50 майданчиків, приватні дилери
3. Локалізація	Концентрована: м. Вінниця (вул. С. Зулінського, Немирівське шосе, вул. Г. Успенського).	Дисперсна (розпорошена): об'їзна дорога (с. Стрижавка, с. Зарванці), м. Гайсин, м. Немирів
4. Ключові гравці	«Агромаш-В», «Вінниця-Скан», дилери Ford Trucks, MAN, DAF,	Автомайданчики в р-ні с. Стрижавки, приватні імпортери (TIR-площадки на трасі М-30).
5. Особливості сервісу	Обов'язкова гарантія, сертифіковане ТО, лізингові програми придбання від виробника, Trade-in (викуп старої техніки в залік нової)	Передпродажна підготовка «власними силами», гнучке ціноутворення, переобладнання під замовника
6. Специфіка	Формує технологічний авангард парку регіону (екологічність, паливна економічність)	Забезпечує кількісну масу парку та гнучкість малого і середнього бізнесу (аграрний сектор, будівельна сфера)

Наведені дані свідчать про те, що вторинний ринок CPC у Вінницькій області, зосереджений на об'їзній м. Вінниці, виконує роль «кількісного демпфера», забезпечуючи доступною технікою малих і

середніх агровиробників, тоді як дилерський сегмент формує якісний стандарт експлуатації. Водночас існує системний розрив: при надлишку вживаних тягачів спостерігається дефіцит спеціалізованих надбудов, що змушує споживачів звертатися до точкових послуг переобладнання.

Дослідження реєстраційних даних суб'єктів господарювання дозволяє класифікувати сервісну інфраструктуру за КВЕД-2010 (табл. 3) [17].

Таблиця 3. Розподіл суб'єктів господарювання за основними кодами КВЕД

КВЕД	Назва діяльності	Частка, %	Характеристика сервісу
45.20	ТО та ремонт автотранспорту	75%	Універсальні станції технічного обслуговування (СТО) виконують всі види робіт з технічного обслуговування (ТО) та поточного ремонту (ПР) СРС. Основний фокус на ходову частину та двигун.
45.31	Оптова торгівля деталями	15%	Магазини-сервіси. Ремонтна зона часто є інструментом продажу запчастин.
33.12	Ремонт машин і устаткування	7%	Вузькоспеціалізовані. Ті, хто офіційно ремонтує крани, маніпулятори та складну гідравліку.
71.20	Технічні випробування та аналіз	3%	Центри сертифікації та техогляду (лабораторії).

Аналіз даних табл. 3 показує, що спостерігається критичний перекис у бік загального ремонту (45.20). Це означає, що ринок сервісу складних надбудов (гідравлічних систем, рефрижераторних установок та ін.) у м. Вінниці де-юре перебуває «у тіні» загального автосервісу, що ускладнює контроль якості та спеціалізацію кадрів.

Аналіз просторового розташування СТО у Вінницькому регіоні показує «центробіжну модель» з критичною нерівномірністю. Центральний вузол (м. Вінниця та передмістя – Стрижавка, Лука-Мелешківська, Якушинці) концентрує понад 85% високотехнологічних сервісів завдяки перетину магістралей М- 30 та М- 21. Північний напрям (Козятин, Калинівка) має середню щільність майстерень, орієнтованих на транзит у бік Києва. Південний і південно-західний райони (Жмеринка, Бар, Могилів-Подільський) відчувають дефіцит спеціалізованого сервісу, що змушує аграріїв транспортувати техніку до обласного центру, збільшуючи час простою у 1,5-2 рази. На сході (Гайсин, Ладизин) сервісна база функціонує локально при великих агропромислових підприємствах, але є закритою для сторонніх перевізників.

Технічна експлуатація спеціалізованого рухомого складу на базі вантажних шасі неможлива без розгалуженої мережі вантажного шинного сервісу. У межах Вінницького промислового вузла функціонує близько 12-15 спеціалізованих центрів, здатних працювати з шинами великих радіусів (R20, R22.5, R24) та специфічними сільськогосподарськими шинами. Концентрація СТО у Вінницькій області має чітку просторову логіку. Найбільше сервісів зосереджено на об'їзних дорогах Вінницького району (Тиврівське, Хмельницьке, Немирівське шосе), адже великовантажні автомобілі не заїжджають у центр міста. Уздовж траси М- 30 (Стрий – Тернопіль – Кропивницький – Знам'янка) сформувався ланцюг шиномонтажних сервісів у Літині та Гайсині, де проходить інтенсивний транзитний потік. У районних центрах аграрного поясу (Бердичів, Тульчин, Могилів-Подільський) концентрація сервісів пов'язана із сезонною потребою агротехніки у заміні шин.

У Вінниці функціонує лише 6-8 спеціалізованих мийок для вантажних автопоїздів та спецтехніки з негабаритним обладнанням, що зумовлено високими технічними вимогами (потужні очисні споруди, приміщення понад 4 м, значні витрати води). Їхня концентрація спостерігається у промислових зонах (вул. Тарногородського, Київська), на виїздах уздовж траси М- 30 (с. Якушинці, район «Епіцентру») та при великих перевізниках і дилерських центрах, де порталні мийки здебільшого обслуговують власний парк, іноді надаючи послуги стороннім клієнтам.

Згідно з даними Головного управління статистики у Вінницькій області на початку 2026 року загальна кількість автозаправних станцій (АЗС) в області коливається в межах 300-310 об'єктів. Їх приблизний розподіл за територіальним принципом подано у таблиці 4, з якої видно, що близько 25% усіх АЗС області зосереджені безпосередньо в обласному центрі. Інші об'єкти тяжіють до «транспортних коридорів» міжнародного та національного значення (траси М-21 і М-30), що є критично важливим для обслуговування СРС на шасі вантажних автомобілів.

Таблиця 4. Розподіл загальної кількості АЗС за територіальним принципом

Адміністративно-територіальна одиниця	Кількість АЗС (орієнтовно)	Особливості концентрації
1. Місто Вінниця	~65–75	Найвища концентрація, переважно на виїздах (Хмельницьке, Немирівське, Київське шосе) та промислових зонах
2. Вінницький район (без міста)	~50–60	Висока щільність уздовж магістральних трас М-30 та М-21 (навколо м. Вінниці)
3. Гайсинський район	~40–45	Вузлові точки: м. Гайсин, м. Ладижин, траса М-30
4. Жмеринський район	~30–35	Зосереджені у м. Жмеринка та м. Бар
5. Могилів-Подільський район	~30–35	Акцент на прикордонну зону та м. Могилів-Подільський
6. Тульчинський район	~30	Рівномірне покриття районного центру та основних доріг
7. Хмельницький район	~35–40	Вузли: м. Хмельник, м. Козятин, м. Калинівка.

Національні оператори «ОККО», «WOG», «Shell», «БПСМ-Нафта» приділяють велику увагу спеціалізації під великогабаритний транспорт:

- високошвидкісні колонки (High-speed diesel pumps), які забезпечують швидкість заправки до 130 л/хв, що критично для великих паливних баків спецмашин;
- системи AdBlue: наявність стаціонарних колонок з сечовиною (замість каністр) є індикатором відповідності АЗС сучасним екологічним стандартам «Euro-5/6», що обов'язково для нового CPC;
- габаритні параметри: наявність широких радіусів заїзду та високих навісів (понад 4,5 м), що дозволяє обслуговувати негабаритну техніку на шасі вантажних автомобілів і трали.

Застосування паливних карток та мобільних сервісів (типу «ОККО Pay») дозволяє власникам парків спецтехніки у Вінниці отримувати «цифровий слід» кожної заправки. Це інтегрує фізичну інфраструктуру в систему управлінського обліку підприємства, перетворюючи АЗС на інструмент дистанційного контролю витрат та енергоефективності логістичних процесів.

Трансформація Вінницького регіону у логістичний вузол зумовлює перехід від розрізнених майданчиків для відстою великовантажних автопоїздів до створення мультимодальних «сухих портів». Відкриття контейнерного термінала біля станції «Вінниця-Вантажна» формує попит на спеціалізований сервіс для шасі-контейнеровозів, який наразі покриває лише близько 30% потреби.

При загальній насиченості закладами харчування, Вінницький регіон відчуває гострий дефіцит спеціалізованих кемпінгів для тривалого відстою з розвинутою побутовою інфраструктурою («Laundry & Kitchen zones»), що є бар'єром для розвитку транзитного потенціалу області. Дефіцит сертифікованих кемпінгів з високим рівнем безпеки змушує водіїв спецтранспорту порушувати режим відпочинку або зупинятися в необладнаних місцях, що підвищує ризики ДТП та крадіжок обладнання.

Вінницький регіон через своє географічне положення перетворився на транзитний складський хаб, що забезпечує деталями не лише власну область, а й сусідні Хмельницьку та Житомирську. За даними реєстрів, у регіоні діє понад 120 спеціалізованих точок продажу запчастин для вантажних автомобілів та спецтехніки (табл. 5):

- м. Вінниця (~80 об'єктів): основна концентрація на вул. Сергія Зулінського (район «ГПЗ») та вул. Максима Шимка (район «Тяжилів»);
- райони області (~40 об'єктів): найбільші осередки – м. Гайсин (через близькість траси М-30) та м. Жмеринка.

Таблиця 5. Кількісний розподіл точок продажу запчастин

Категорія постачальника	Кількість (м. Вінниця)	Кількість (райони області)	Особливість діяльності
1. Мережеві маркети («Strans», «Cargo»)	6	4	Прямі контракти з заводами, IT-дефтери
2. Спеціалізовані магазини («TIR»)	25	15	Фокус на двигуни та ходову частину «європейців»
3. Дрібні крамниці та ФОП	40	20	Робота «під замовлення», низька ціна
4. Авторозборки (шроти)	10	5	Тільки вживані вузли (агрегати в зборі)

Ключовими мережевими гравцями ринку постачання запчастин у Вінницькому регіоні виступають три компанії, що формують основу магістральної логістики. «Cargo Parts» має потужний склад-магазин у районі «ГПЗ» та вирізняється власною системою доставки «день у день» по області. «Strans» характеризується агресивною логістичною політикою та широким асортиментом запчастин до причепів і напівпричепів (осі «SAF», «BPW»), забезпечуючи потреби транзитного транспорту з великого складу на виїзді з міста. «Inter Cars Ukraine» як глобальний оператор пропонує найширший вибір аналогів («LUK», «SACHS», «Bosch») та інтегровану ІТ-платформу, що дозволяє місцевим підприємцям оперативно замовляти деталі зі складів у Польщі. Така триєдина структура забезпечує баланс між швидкістю доставки, спеціалізацією асортименту та доступом до міжнародних ресурсів.

Досвід «Scania» та «Strans» засвідчує: зовнішня архітектурна привабливість дилерських центрів має другорядне значення, тоді як ефективність визначається цифровими інструментами та логістичним моніторингом. У Вінницькому регіоні цифровізація реалізується переважно автономними рішеннями великих гравців: телематичний контроль (Scania, MAN) охоплює понад 30% сучасного парку СРС агрохолдингів, а маркетплейси («Strans», «Inter Cars») з мобільними додатками за VIN-кодом скорочують час ідентифікації деталей з годин до хвилин.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для системного представлення результатів дослідження авторами сформовано морфологічну матрицю сервісної інфраструктури Вінницького регіону (табл. 6). Матриця дозволяє ідентифікувати ключові вузли концентрації послуг, їхню нормативно-правову базу (КВЕД) та реальну ринкову потужність, що є основою для подальшого стратегічного планування розвитку логістичного потенціалу області.

Таблиця 6. Матриця сервісної інфраструктури Вінницького регіону для СРС

Елемент інфраструктури	Типи ТЗ та послуг	Локації (Вінниччина)	Спеціалізація	Рівень насиченості, %
1. Продаж нового СРС	Тягачі, самоскиди, зерновози («Еуго-6»)	М. Вінниця (дилерські хаби)	Прямі контракти, гарантійний супровід	75% (високий)
2. Ринок СРС, бувшого у використанні	Спецшасі, бетонозмішувачі, техніка з ЄС	Об'їзна (с. Стрижавка, Якушинці), райцентри на М30	Доступність, швидке введення в експлуатацію	90% (дуже високий)
3. ТО та ремонт шасі	Двигуни, КПП, ходова частина	Промислові зони м. Вінниці, СТО при ПАТ	Підтримання робочого стану парку	80% (стабільний)
4. Сервіс надбудов	Гідравліка, маніпулятори, помпи	Спеціалізовані майстерні, агрегатні заводи	Ремонт робочих органів спецмашин	55% (середній)
5. Енергетичне забезпечення	АЗС, AdBlue, швидкі колонки	Мережеві комплекси (ОККО, WOG)	Оперативна дозаправка великовагових АТЗ	85% (високий)
6. Логістичні вузли	Сухі порти, термінали, перевалка	Вінниця (ВКТ, район Гонти)	Мультиmodalність (автомобіль-залізниця)	40% (формується)
7. Рекреаційний блок	Стоянки TIR, мотелі, кемпінги	Об'їзна дорога, великі розв'язки	Відпочинок екіпажів, безпека вантажу	35% (дефіцитний)

Розроблена матриця наочно демонструє диспропорцію у розвитку інфраструктурних елементів (асиметрію ринку сервісних послуг). Виявлено критичний розрив між високим рівнем готовності до ремонту ходової частини (шасі) та недостатньою кількістю сертифікованих центрів з обслуговування складних надбудов (гідравлічних систем, холодильних установок тощо).

Найвищий рівень насиченості, спостерігається у сегментах з коротким інвестиційним циклом (продаж вживаної техніки – 90%, АЗС – 85%). Водночас, капіталомісткі та високотехнологічні сегменти («сухі порти» – 40%, спеціалізована рекреація – 35%) перебувають на стадії формування. Це вказує на те, що інфраструктура Вінниччини наразі розвивається за екстенсивним шляхом, тоді як сучасні вимоги до експлуатації спеціалізованого рухомого складу вимагають інтенсифікації та

цифровізації сервісних процесів. Такий стан ринку сервісних послуг для СРС визначає перспективні напрями для інвестування та державного регулювання у регіоні.

На основі розрахованих коефіцієнтів територіальної щільності та виявлених «інфраструктурних розривів», пропонуються такі рекомендації.

Для органів місцевого самоврядування (Вінницька ОВА та районні ради):

- стимулювання кластеризації: впровадження пільгових умов оренди землі для об'єктів, що поєднують 3+ сервіси (наприклад: АЗС + вантажне СТО + мийка) у дефіцитних районах (Гайсинський, Могилів-Подільський);

- інфраструктурний моніторинг: створення інтерактивної карти-схеми щільності, яка допоможе бізнесу бачити реальні потреби ринку, уникаючи надмірної концентрації у м. Вінниця.

Для бізнес-інвесторів (мережі АЗС типу «Авантаж», «ОККО» та приватні СТО):

- диверсифікація послуг: перехід від моделі «продаж пального» до моделі «мобільний сервіс» («Uber-модель»). Враховуючи низький коефіцієнт сервісного покриття, доцільно впроваджувати мобільні бригади ТО і ПР для спецтехніки, що працює «в полі» (агросектор, будівництво);

- фокус на «Еко-сервіс»: будівництво спеціалізованих мийок із замкнутим циклом водоочищення на транзитних ділянках траси М-30, де їх дефіцит складає понад 70%.

Для логістичних компаній: формування корпоративних «сервісних хабів» на базі існуючих АЗС дискаунтерів, що дозволить знизити собівартість експлуатації спеціалізованого рухомого складу.

Реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити інтегральний коефіцієнт сервісної потужності Вінницької області на 15-20% протягом найближчих 3 років, забезпечивши сталий розвиток ринку сервісних послуг для спеціалізованого транспорту.

ВИСНОВКИ

Проведений комплексний аналіз інфраструктури сервісу спеціалізованого рухомого складу на шасі вантажних автомобілів у Вінницькому регіоні дозволяє сформулювати наступні підсумки та стратегічні кроки:

- подолання структурної асиметрії та географічного дисбалансу. Розроблена морфологічна матриця виявила критичний розрив: при високій насиченості ринку вживаним СРС (90%) та паливними хабами (85%), рекреаційний та термінальний сектори забезпечені лише на 35-40%. Концентрація 85% сервісних потужностей у Вінницькому вузлі («ГПЗ», «Тяжлив», «Сабарів») потребує децентралізації та скорочення логістичного плеча зі 100 км до нормативних 30–40 км;

- інтеграція в мультимодальну інфраструктуру. Розбудова «сухих портів» (зокрема «Вінницького контейнерного терміналу») визначає новий вектор розвитку сервісу. Необхідне створення спеціалізованих постів обслуговування фітінгів та важковагових шасі-контейнеровозів безпосередньо в зонах митного очищення та перевалки вантажів;

- юридична та технологічна стандартизація (КВЕД 33.12). Аналіз підтвердив, що лише ~5% підприємств офіційно спеціалізуються на ремонті складних надбудов. Стратегічним кроком є приведення діяльності сервісів у відповідність до КВЕД 33.12 для легального обслуговування гідравлічних та підйомних механізмів, а також модернізація неформальних «місць сили» (ФОП), які утримують понад 50% парку;

- екологізація та технологічне очищення. Створення спеціалізованих мийок для великогабаритного СРС із системами фільтрації є критичним не лише як екологічна вимога, а й як обов'язкова умова для якісної дефектовки та діагностики вузлів спецтехніки;

- забезпечення безпеки та рекреації екіпажів. Виявлено гострий дефіцит сертифікованих кемпінгів та ТІР-паркінгів. Розбудова інфраструктури відпочинку водіїв є обов'язковою умовою експлуатації автопоїздів особливо великої вантажопідйомності згідно з європейськими стандартами безпеки вантажів та праці;

- цифрова трансформація та оптимізація «останньої милі». Майбутнє регіонального сервісу полягає у переході до моделі «Predictive Maintenance» (концепція «Digital Twin») та AR-консультування. Масштабування досвіду мережевих гравців («Strans», «ОККО») через створення регіональних мікро-складів та мобільних постів спецшиномонтажу дозволить скоротити час простою техніки з 9 діб до < 24 годин.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кашканов А. А., Буряк В.В., Москалюк М.Л. Аспекти логістичного забезпечення виробничих процесів підприємств автомобільного транспорту України. Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 23-

- 25 жовтня 2023 року: збірник наукових праць. Вінниця: ВНТУ. 2023, С. 154-156. https://atm.vntu.edu.ua/konf/Zbirnyk_STPR_AT_2023.pdf.
2. Kashkanova A., Rotshtein A., Kashkanov A., Katelnikov D. Intelligent model for reliability control and safety in urban transport systems. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025, 15(4), P. 100-107. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8276>.
3. Кашканов А. А., Москалюк М. Л. Методи обґрунтування запасів запасних частин у системі управління транспортним процесом. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024, 1(19), С. 68-74. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74>.
4. Комчатних О. В., Петровська С. І., Редько Н. О. Сучасний стан та перспективи розвитку транспортної інфраструктури в Україні. *Причорноморські економічні студії*. 2021, 64, С. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2>.
5. Осадчий М. Л. Пріоритети стратегічного розвитку транспортно-інфраструктурних підприємств. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2024, 7-8 (320-321), С. 166-174. <https://doi.org/10.32680/2409-9260-2024-7-8-320-321-166-174>.
6. Субочев О. І., Мартинюк В. В., Січко О. Є. Підвищення ефективності сервісних підприємств за рахунок зацікавленості клієнтів автопослуг. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020, 3(34), С. 358-369. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).358-369](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).358-369).
7. Katsaliaki K., Galetsi P., Kumar S. Supply chain disruptions and resilience: a major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*. 2022, 319, P. 965-1002. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1>.
8. Надич Т. М., Аулін В. В., Гриньків А. В., Слонь В. В. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025, 11(42), С. 313-327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).
9. Hosseini Shekarabi S., Kiani Mavi R. & Romero Macau F. Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions. *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2025, 26, 681-735. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00458-8>.
10. Mahale Y., Kolhar S., More A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *Discover Applied Sciences*. 2025, 7, 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>.
11. Mykich K., Zavushchak I., Savka A. Predictive maintenance for automotive vehicle engines in military logistics. *Proceedings of the Modern Machine Learning Technologies Workshop (MoMLet 2024)*, Lviv, Ukraine, May 31 - June 1, 2024. *CEUR Workshop Proceedings*, 3711, urn:nbn:de:0074-3711-6, P. 333-344. <https://ceur-ws.org/Vol-3711/paper21.pdf>.
12. Shykhmat A., Veres Z. Agriculture Vehicles Predictive Maintenance With Telemetry, Maintenance History and Geospatial Data. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024, 9(2), P. 134-139. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.134>.
13. Москалюк М. Л., Кашканов А. А. Управління запасами запасних частин у логістиці автомобільних перевезень в умовах багатофакторної невизначеності. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025, 2(25), С. 230-238. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1931>.
14. Буряк В., Кашканов А. Інтелектуальні системи моніторингу в логістиці зернових: вплив на експлуатаційні витрати автомобільного транспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2025, 28, С. 6-13. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.28.0.1>.
15. Babenko V., Mukashev T., Liubokhynets L., Iurchenko M. et al. Managing Transport Systems with Artificial Intelligence. *Journal of Information Technology Management*. 2025, 17(2), P. 13-27. <https://doi.org/10.22059/jitm.2025.101574>.
16. Ince E.C. Mapping the Path to Sustainable Urban Mobility: A Bibliometric Analysis of Global Trends and Innovations in Transportation Research. *Sustainability*. 2025, 17(4), 1480. <https://doi.org/10.3390/su17041480>.
17. Класифікація видів економічної діяльності : КВЕД-2010 : ДК 009:2010 : прийнято наказом Держспоживстандарту України від 11.10.2010 № 457. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 374 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vb457609-10#Text> (Редакція від 04.01.2023).

REFERENCES

1. Kashkanov A. A., Buriak V.V., Moskaliuk M.L. Aspekty lohistychnoho zabezpechennia

vyrobnnych protsesiv pidpriemstv avtomobilnoho transportu Ukrainy. Materialy XVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnologii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu», 23-25 zhovtnia 2023 roku: zbirnyk naukovykh prats. Vinnytsia: VNTU, 2023. S. 154-156. https://atm.vntu.edu.ua/konf/Zbirnyk_STPR_AT_2023.pdf.

2. Kashkanova A., Rotshtein A., Kashkanov A., Katelnikov D. Intelligent model for reliability control and safety in urban transport systems. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025, 15(4), P. 100-107. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8276>.

3. Kashkanov A., Moskaliuk M. Methods of justification of spare parts stocks in the transport process management system. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2024, 10(1), P. 68-74. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74>.

4. Komchatnykh O., Petrovska S., Redko N. Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku transportnoi infrastruktury v Ukraini. *Prychornomorski ekonomichni studii*. 2021, 64, S. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2>.

5. Osadshyi M. Priorities of strategic development of transport and infrastructure enterprises. *Scientific Bulletin of the Odessa National Economic University*. 2024, 7-8 (320-321), P. 166-174. <https://doi.org/10.32680/2409-9260-2024-7-8-320-321-166-174>.

6. Subochev O., Martynyuk V., Sichko O. Efficiency Upgrading of Service Enterprises at the Price of Interest of Auto Services' Clients. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2020, 3(34), P. 358-369. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).358-369](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).358-369).

7. Katsaliaki K., Galetsi P., Kumar S. Supply chain disruptions and resilience: a major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*. 2022, 319, P. 965-1002. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1>.

8. Nadych T., Aulin V., Hrynkyv A., Slon V. Methods and Measures for Improving the Technical Service System of Trucks Based on a Cyber-Physical Approach and the Development of Scientific and Technical Documentation of its Operations. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025, 11(42), C. 313-327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).

9. Hosseini Shekarabi S., Kiani Mavi R. & Romero Macau F. Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions. *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2025, 26, 681-735. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00458-8>.

10. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *Discover Applied Sciences*. 2025, 7, 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>.

11. Mykich K., Zavushchak I., Savka A. Predictive maintenance for automotive vehicle engines in military logistics. *Proceedings of the Modern Machine Learning Technologies Workshop (MoMLeT 2024)*, Lviv, Ukraine, May 31 - June 1, 2024. *CEUR Workshop Proceedings*, 3711, urn:nbn:de:0074-3711-6, P. 333-344. <https://ceur-ws.org/Vol-3711/paper21.pdf>.

12. Shykhmat A., Veres Z. Agriculture Vehicles Predictive Maintenance With Telemetry, Maintenance History and Geospatial Data. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024, 9(2), P. 134-139. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.134>.

13. Moskaliuk M., Kashkanov A. Spare Parts Inventory Management in Freight Transport Logistics under Multifactor Uncertainty. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2025, 2(25), C. 230-238. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1931>.

14. Buriak V., Kashkanov A. Intelligent Monitoring Systems in Grain Logistics: Impact on Operational Costs of Road Transport. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*. 2025, 28, P. 6-13. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.28.0.1>.

15. Babenko V., Mukashev T., Liubokhynets L., Iurchenko M. et al. Managing Transport Systems with Artificial Intelligence. *Journal of Information Technology Management*. 2025, 17(2), P. 13-27. <https://doi.org/10.22059/jitm.2025.101574>.

16. Ince E.C. Mapping the Path to Sustainable Urban Mobility: A Bibliometric Analysis of Global Trends and Innovations in Transportation Research. *Sustainability*. 2025, 17(4), 1480. <https://doi.org/10.3390/su17041480>.

17. Klasyfikatsiia vydiv ekonomichnoi diialnosti : KVED-2010 : DK 009:2010 : pryiniato nakazom Derzhspozhyvstandartu Ukrainy vid 11.10.2010 № 457. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010. 374 s. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vb457609-10#Text> (Redaktsiia vid 04.01.2023).

A. Kashkanov, V. Kashkanov, V. Varchuk, A. Dmytriieva, M. Moskaliuk. Comprehensive Analysis of Service Infrastructure for Specialised Rolling Stock on Truck Chassis in The Vinnytsia Region

The article presents a comprehensive analysis of the infrastructure of the service market for specialised rolling stock on truck chassis in the Vinnytsia region. The study is based on a systemic approach to assessing service potential and identifying structural imbalances in its development. The authors have developed a morphological matrix of service capabilities, which revealed significant asymmetry: despite the high saturation of the market with used equipment (over 90%) and an extensive network of fuel hubs (around 85%), there is a shortage of high-tech logistics nodes such as “dry ports” and specialised recreational infrastructure for vehicle personnel (only 35–40%). The necessity of legal standardisation of superstructure services in accordance with the classification NACE 33.12 is substantiated, ensuring market transparency and enhancing its integration into international standards. Innovative models of infrastructure modernisation are proposed, based on the application of the Uber-model of mobile service, augmented reality technologies for diagnostics and staff training, as well as the concept of predictive maintenance. Strategic directions for decentralising service capacities, developing multimodal logistics centres, and integrating regional infrastructure into the European transport space are outlined. The practical significance of the study lies in establishing methodological foundations for optimising the service market, improving the efficiency of rolling stock utilisation, and strengthening the competitiveness of the transport system of the Vinnytsia region.

Key words: *specialised rolling stock, service infrastructure, technical operation, spare parts logistics, digitalisation, predictive maintenance, augmented reality technologies.*

КАШКАНОВ Андрій Альбертович, д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

КАШКАНОВ Віталій Альбертович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: v.kashkanov@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3897-6792>

ВАРЧУК В'ячеслав Володимирович, асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vvvarchuk@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0005-2622-9780>

ДМИТРИЄВА Алла Володимирівна, інженер кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: dmitrieva1963@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0000-1027-0061>

МОСКАЛЮК Микола Леонідович, аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: moskalyuk255@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4660-8858>

Andrii KASHKANOV, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

Vitalii KASHKANOV, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: v.kashkanov@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3897-6792>

Vyacheslav VARCHUK, assistant, Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: vvvarchuk@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0005-2622-9780>

Alla DMYTRIIEVA, engineer, Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: dmitrieva1963@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0000-1027-0061>

Mykola MOSKALIUK, PhD student, Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: moskalyuk255@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4660-8858>

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

<https://doi.org/10.36910/pejvm07>

УДК 658.5.009.12:338.436
UDK 658.5.009.12:338.436

Козак С.В.

Національний університет водного господарства та природокористування

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ У ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ

Дослідження операцій у транспортних системах міжнародних вантажоперевезень є важливим інструментом підвищення ефективності логістичних процесів в умовах глобалізації світової економіки. Міжнародні перевезення характеризуються складністю маршрутів, наявністю митних процедур, різними нормативно-правовими вимогами країн, валютними ризиками та високою залежністю від зовнішніх факторів (політичних, економічних, інфраструктурних).

Методи дослідження операцій дозволяють оптимізувати маршрути перевезень, мінімізувати транспортні витрати, скоротити час доставки та підвищити надійність логістичних ланцюгів. Найчастіше застосовуються методи лінійного та цілочисельного програмування, транспортні моделі, мережеве планування, теорія масового обслуговування, імітаційне моделювання та евристичні алгоритми.

Особлива увага приділяється задачам вибору оптимального виду транспорту (автомобільного, залізничного, морського, авіаційного або мультимодального), формуванню ефективної маршрутної мережі, управлінню ризиками та координації міжнародних логістичних потоків. Впровадження сучасних інформаційних систем, цифрових платформ і технологій моніторингу сприяє підвищенню прозорості перевезень та оперативності прийняття управлінських рішень.

Таким чином, застосування методів дослідження операцій у сфері міжнародних вантажоперевезень забезпечує раціональне використання ресурсів, підвищення конкурентоспроможності транспортних підприємств та інтеграцію національних транспортних систем у глобальні логістичні мережі.

В статті розглянуто застосування методів дослідження операцій у транспортних системах міжнародних вантажоперевезень. Проаналізовано особливості функціонування міжнародних транспортно-логістичних систем як складних соціально-економічних і технічних систем. Визначено основні задачі оптимізації, що виникають у процесі планування та управління міжнародними вантажними перевезеннями. Особливу увагу приділено використанню імітаційного моделювання, оптимізаційних методів та сучасних інформаційних технологій для підвищення ефективності міжнародних перевезень. Обґрунтовано доцільність комплексного застосування методів дослідження операцій для прийняття управлінських рішень у міжнародних транспортних системах.

Ключові слова: дослідження операцій, міжнародні вантажоперевезення, транспортні системи, оптимізація, логістика, моделювання, управління перевезеннями.

ВСТУП

Динамічний Міжнародні вантажоперевезення є важливою складовою світової економіки та забезпечують інтеграцію національних господарських систем у глобальні логістичні ланцюги. Сучасні транспортні системи міжнародних перевезень характеризуються складною структурою, багатоваріантністю маршрутів, використанням різних видів транспорту, а також необхідністю врахування митних, правових, економічних та екологічних обмежень. За таких умов ефективне управління міжнародними вантажопотоками можливе лише на основі науково обґрунтованих методів, серед яких особливе місце посідає дослідження операцій.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питання розвитку транспортно-логістичних систем та управління міжнародними вантажними перевезеннями висвітлено у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. Досліджуються проблеми формування транспортних мереж, оптимізації маршрутів, управління логістичними потоками та інтеграції транспортних систем у європейський і світовий простір. Водночас значна частина наукових робіт має фрагментарний характер і не враховує комплексного застосування методів дослідження операцій для управління міжнародними перевезеннями, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є дослідження можливостей застосування методів дослідження операцій для підвищення ефективності функціонування транспортних систем міжнародних вантажоперевезень. Основними задачами дослідження є: – аналіз особливостей міжнародних транспортних систем як об'єкта дослідження операцій; – визначення ключових задач оптимізації у міжнародних вантажоперевезеннях; – обґрунтування доцільності використання інформаційних технологій та імітаційного моделювання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Транспортна система міжнародних вантажоперевезень являє собою складну багаторівневу соціально-економічну систему, що включає транспортні засоби різних видів (автомобільний, залізничний, морський, авіаційний транспорт), об'єкти інфраструктури (порти, термінали, склади, митні переходи), логістичні центри, інформаційно-комунікаційні платформи та суб'єкти господарювання. Її функціонування спрямоване на забезпечення безперервного, своєчасного та економічно доцільного переміщення вантажів між державами з урахуванням міжнародних нормативно-правових вимог.

Особливістю міжнародних вантажоперевезень є наявність додаткових факторів невизначеності: митні процедури, валютні ризики, коливання тарифів, геополітичні обмеження, різні стандарти інфраструктури та технічні регламенти. У таких умовах ефективне управління транспортними процесами неможливе без використання методів дослідження операцій, які дозволяють формалізувати логістичні задачі та обґрунтовувати управлінські рішення на основі кількісного аналізу. Узагальнену структуру світового вантажо і пасажирообігу подано на рис. 1.



Рисунок 1 – Узагальнена структура транспортної системи міжнародних вантажоперевезень

У процесі функціонування системи виникають типові задачі дослідження операцій, серед яких ключовими є: оптимізація маршрутів перевезення з урахуванням відстані, часу, вартості та ризиків; вибір виду або комбінації видів транспорту (інтермодальні та мультимодальні перевезення); розподіл рухомого складу та складських потужностей; управління потоками вантажів у транспортних вузлах; мінімізація простоїв і перевантажень інфраструктури; забезпечення стійкості логістичних ланцюгів.

Застосування методів дослідження операцій дозволяє: оцінювати альтернативні варіанти організації перевезень, прогнозувати наслідки управлінських рішень, моделювати вплив змін зовнішнього середовища, зменшувати логістичні ризики, підвищувати рівень сервісу при одночасному зниженні витрат.

Таким чином, результати дослідження свідчать, що застосування методів дослідження операцій у транспортних системах міжнародних вантажоперевезень забезпечує підвищення економічної ефективності, скорочення витрат, оптимізацію логістичних процесів та формування конкурентних переваг підприємств на міжнародному ринку транспортних послуг.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, отримані результати підтверджують, що комплексне застосування методів дослідження операцій у поєднанні з сучасними інформаційними технологіями сприяє підвищенню ефективності міжнародних вантажоперевезень, забезпечує прозорість логістичних процесів та покращує якість управлінських рішень.

ВИСНОВКИ

Методи дослідження операцій є ефективним інструментом управління транспортними системами міжнародних вантажоперевезень, оскільки вони забезпечують науково обґрунтовану підтримку процесу прийняття управлінських рішень. Їх застосування дозволяє формалізувати складні логістичні процеси, врахувати численні обмеження (часові, ресурсні, фінансові, митні) та обрати оптимальні варіанти організації перевезень у багатокритеріальному середовищі.

Використання оптимізаційних моделей сприяє раціональному формуванню маршрутів міжнародної доставки, вибору доцільних транспортних коридорів та мінімізації загальних

логістичних витрат. Завдяки цьому зменшуються витрати на паливо, експлуатацію рухомого складу, простої на кордоні та перевантаження у транспортних вузлах. Крім того, застосування методів дослідження операцій дозволяє підвищити точність планування графіків перевезень, скоротити час доставки та покращити рівень сервісу для клієнтів.

Особливого значення набуває використання імітаційного моделювання та сценарного аналізу, які дають змогу оцінити вплив ризиків і невизначеності на функціонування міжнародних логістичних ланцюгів. Це дозволяє заздалегідь розробляти альтернативні маршрути та резервні схеми постачання, що підвищує стійкість транспортної системи до зовнішніх викликів, таких як зміни тарифної політики, обмеження транзиту або форс-мажорні обставини.

У результаті впровадження методів дослідження операцій підвищується конкурентоспроможність транспортних підприємств на міжнародному ринку, оскільки вони отримують можливість пропонувати більш економічно вигідні, надійні та прогнозовані логістичні рішення. Оптимізація процесів сприяє не лише скороченню витрат, а й підвищенню прозорості діяльності, покращенню контролю за рухом вантажів та інтеграції у глобальні транспортно-логістичні мережі.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розвиток цифрових систем підтримки прийняття рішень у сфері міжнародної логістики, зокрема на інтеграцію технологій штучного інтелекту, великих даних, хмарних платформ і геоінформаційних систем. Перспективним напрямом є створення адаптивних моделей управління транспортними потоками, які в реальному часі враховують зміни зовнішнього середовища та автоматично коригують маршрути перевезень. Це забезпечить підвищення ефективності функціонування міжнародних транспортних систем та їхню стійкість в умовах динамічного розвитку світової економіки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Устенко М. О. Актуальність формування транспортно-логістичних систем в умовах євроінтеграції / М. О. Устенко // Вісн екон. трансп. і пром-сті.— 2015. — № 49. — С. 207–210.
2. Бойко О. В. Ринок транспортних послуг: основи методології розвитку: монограф. / О. В. Бойко. — К. : Кондор, 2014. — 494 с.
3. Брагінський В. В. Розвиток транспортно-логістичної системи як форма реалізації транзитного потенціалу України / В. В. Брагінський // Державне управління: теорія і практика.—2011— № 2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.academy.gov.ua/ej/ej14/index.htm>.
4. Іртищева І. О. Структура транспортно-логістичної системи України / І. О. Іртищева, С. М. Мінакова, О. А. Христенко // Глобальні та національні проблеми економіки.—201 — № 4. — С. 146–149.
5. Михайличенко К. М. Відновлення транзитного потенціалу як чинник підвищення конкурентоспроможності України / К. Михайличенко // Стратегічні пріоритети. —2015. — № 4. — С. 59–65.
6. Попова Н. В. Транспортно-логістична система: дефініція та складові / Н. В. Попова // Бізнес Інформ. — 2016. — № 1. — С. 169–174.
7. Соколова О. Є. Теоретико-методологічні основи формування транспортно-логістичної системи України [Електронний ресурс] / О.Є.Соколова.—Режим доступу : <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/182/173>.
8. Чернявська Т. А. Стратегічні напрями розвитку транспортно-комунікативної системи України в контексті забезпечення національної безпеки і самодостатності / Т. Чернявська // Екон. вісн. Нац. гірн. ун-ту. — 2015. — № 3. — С. 68–76.
9. Зайцева І. Ю. Фінансово-правові аспекти процесу інтеграції України до Транс-Європейської транспортної мережі ТЕМ-Т / І. Ю. Зайцева // Вісн. екон. трансп. і пром-сті. — 2014. — № 46. — С. 223–227.
10. Садловська І. П. Розвиток національної транспортної мережі України та її інтеграція до пріоритетних транспортних мереж ЄС / І. Садловська // Зб. наук пр. Держ. екон.-техн. ун-ту трансп. — 2015. — № 31. — С. 16–26.
11. Ткач О. В. Формування єдиної логістичної системи: важлива складова євро-інтеграційних процесів / О. В. Ткач, І. А. Волощук // Наук вісн. Херсон. держ. ун-ту. — 2014. — № 9. — С. 208–212. — (Серія «Економіка»).
12. Співробітництво Україна – ЄС в сфері транспорту // Офіційний сайт Представництва України при Європейському Союзі та Європейському Співтоваристві з атомної енергії

[Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://ukraine-eu.mfa.gov.ua/ua/ukraine-eu/sectoral-dialogue/transport>.

13. Міжнародна технічна допомога ЄС у сфері транспорту // Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-tehnichna-dopomoga-es-u-sferi-transportu.html>.

REFERENCES

1. Ustenko M. O. Aktual'nist' formuvannja transportno-logistychnyh system v umovah jevrointegracii' / M. O. Ustenko // Visn ekon. transp. i prom-sti. — 2015. — № 49. — S. 207–210.
2. Bojko O. V. Rynok transportnyh poslug: osnovy metodologii' rozvytku : monograf. /O. V. Bojko. — K. : Kondor, 2014. — 494 s.
3. Bragins'kyj V. V. Rozvytok transportno-logistychnoi' systemy jak forma realizacii' tranzynogo potencialu Ukrai'ny / V. V. Bragins'kyj // Derzhavne upravlinnja: teorija i praktyka. — 2011. — № 2 [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://www.academy.gov.ua/ej/ej14/index.htm>.
4. Irtyshheva I. O. Struktura transportno-logistychnoi' systemy Ukrai'ny / I. O. Irtyshheva, S. M. Minakova, O. A. Hrystenko // Global'ni ta nacional'ni problemy ekonomiky. — 2015. — № 4. — S. 146–149.
5. Myhajlychenko K. M. Vidnovlennja tranzynogo potencialu jak chynnyk pid- vyshhennja konkurentospromozhnosti Ukrai'ny / K. Myhajlychenko // Strategichni priorityty. — 2015. — № 4. — S. 59–65.
6. Popova N. V. Transportno-logistychna systema: definicija ta skladovi / N. V. Popova // Biznes Inform. — 2016. — № 1. — S. 169–174.
7. Sokolova O. Je. Teoretyko-metodologichni osnovy formuvannja transportno-logistychnoi' systemy Ukrai'ny [Elektronnyj resurs] / O. Je. Sokolova. — Rezhym dostupu : <http://jrnل.nau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/182/173>.
8. Chernjavs'ka T. A. Strategichni naprjamy rozvytku transportno-komunikatyvnoi'systemy Ukrai'ny v konteksti zabezpechennja nacional'noi' bezpeky i samodostatnosti /T. Chernjavs'ka // Ekon. visn. Nac. girn. un-tu. — 2015. — № 3. — S. 68–76.
9. Zajceva I. Ju. Finansovo-pravovi aspekty procesu integracii' Ukrai'ny do Trans- Jevropejs'koi' transportnoi' merezhi TEM-T / I. Ju. Zajceva // Visn. ekon. transp.i prom-sti. — 2014. — № 46. — S. 223–227.
10. Sadlovs'ka I. P. Rozvytok nacional'noi' transportnoi' merezhi Ukrai'ny ta i'i' integracija do prioritytnyh transportnyh merezh JeS / I. Sadlovs'ka // Zb. nauk pr. Derzh. ekon.- tehn. un-tu transp. — 2015. — № 31. — S. 16–26.
11. Tkach O. V. Formuvannja jedynoi' logistychnoi' systemy: vazhlyva skladova jevro- integracijnyh procesiv / O. V. Tkach, I. A. Voloshhuk // Nauk visn. Herson. derzh. un-tu. — 2014. — № 9. — S. 208–212. — (Serija «Ekonomika»).
12. Spivrobotnytstvo Ukrai'na – JeS v sferi transportu // Oficijnyj sajт Predstavnytstva Ukrai'ny pry Jevropejs'komu Sojuzi ta Jevropejs'komu Spivtovarystvi z atomnoi'energii' [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://ukraine-eu.mfa.gov.ua/ua/ukraine-eu/sectoral-dialogue/transport>.
13. Mizhnarodna tehnična dopomoga JeS u sferi transportu // Oficijnyj sajт Ministerstva infrastruktury Ukrai'ny [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-tehnichna-dopomoga-es-u-sferi-transportu.html>.

S.V. Kozak, Transport efficiency, project analysis and potential of transport enterprises

Operations research in the transport systems of international freight transportation is an important tool for improving the efficiency of logistics processes in the context of the globalization of the world economy. International transportation is characterized by complex routes, customs procedures, diverse regulatory requirements of different countries, currency risks, and a high dependence on external factors (political, economic, infrastructural). Operations research methods make it possible to optimize transportation routes, minimize transport costs, reduce delivery time, and increase the reliability of logistics chains. The most commonly applied methods include linear and integer programming, transportation models, network planning, queuing theory, simulation modeling, and heuristic algorithms. Special attention is paid to the problems of selecting the optimal mode of transport (road, rail, sea, air, or multimodal), forming an efficient route network, risk management, and coordination of international logistics flows. The implementation of modern information systems, digital platforms, and monitoring technologies contributes to increased

transparency of transportation processes and enhances the efficiency of managerial decision-making. Thus, the application of operations research methods in the field of international freight transportation ensures the rational use of resources, improves the competitiveness of transport enterprises, and promotes the integration of national transport systems into global logistics networks. The article examines the application of operations research methods in the transport systems of international freight transportation. The specific features of the functioning of international transport and logistics systems as complex socio-economic and technical systems are analyzed. The main optimization tasks arising in the process of planning and managing international freight transportation are identified. Particular attention is paid to the use of simulation modeling, optimization methods, and modern information technologies to improve the efficiency of international transport operations. The expediency of the integrated application of operations research methods for managerial decision-making in international transport systems is substantiated.

Keywords: operations research, international freight transportation, transport systems, optimization, logistics, modeling, transport management.

КОЗАК Світлана Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національний університет водного господарства та природокористування e-mail: svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861>

Svitlana KOZAK, Doctor of Economics, Associate Professor of the department of transport technologies and technical service National University of Water Management and Nature Management e-mail svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861>

Дата надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.03.2026

<https://doi.org/10.36910/5zmgma85>

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВО-ШВИДКІСНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕГКОГО КОМЕРЦІЙНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Стаття присвячена експериментальному визначенню показників тягово-швидкісних властивостей легкого комерційного автомобіля у пасажирському варіанті виконання з модифікованою трансмісією для подальшого підтвердження адекватності розробленої математичної моделі руху.

Проаналізовано особливості виробництва та експлуатації сучасних легких комерційних автомобілів. Встановлено, що високий ступінь уніфікації та поширена практика переобладнання вантажних варіантів у пасажирські зумовлюють невідповідність параметрів силових агрегатів та трансмісії фактичним умовам експлуатації. Визначено, що одним із способів усунення такої невідповідності є коригування передаточних чисел трансмісії. Оскільки така модифікація впливає на показники експлуатаційних властивостей автомобіля, виникає потреба у дослідженні його тягово-швидкісних властивостей шляхом дорожніх випробувань.

Обґрунтовано методику проведення експериментальних досліджень із застосуванням вимірювального комплексу високочастотної супутникової телеметрії з частотою дискретизації 10 Гц. Дослідження проводилися на автомобілі Volkswagen Caddy у пасажирському варіанті виконання, оснащеному преселективною роботизованою коробкою передач зі зміненими передаточними числами вищих передач. Заїзди виконувалися для двох варіантів маси: спорядженої (разом з водієм та вимірювальним обладнанням) та повної.

За результатами серії заїздів встановлено показники тягово-швидкісних властивостей. Доведено, що збільшення маси автомобіля до повної призводить до погіршення показників тягово-швидкісних властивостей, так час розгону до швидкості 100 км/год зростає на 34,3 %, а шлях розгону – на 35,7 %. Аналіз згладжених кривих поздовжнього прискорення підтвердив, що розгін відбувається практично без розриву потоку потужності завдяки високій швидкодії преселективної роботизованої коробки передач із подвійним зчепленням.

Ключові слова: легкий комерційний автомобіль, експериментальні дослідження, тягово-швидкісні властивості, динаміка розгону, дорожні випробування, супутникова телеметрія, модифікація трансмісії.

ВСТУП

Легкі комерційні автомобілі (LCV, Light Commercial Vehicles) є невід’ємною складовою сучасних транспортних систем, забезпечуючи виконання широкого спектра завдань у сфері міської та приміської логістики. Продуктивність роботи комерційного транспорту нерозривно пов’язана з його тягово-швидкісними властивостями, оскільки саме вони визначають здатність автомобіля підтримувати високу середню швидкість на маршруті, інтенсивно розганятися та безпечно маневрувати в умовах щільного транспортного потоку.

Характерною особливістю виробництва сучасних LCV є високий ступінь уніфікації, при якому на базі однієї моделі створюються вантажні, пасажирські та вантажопасажирські варіанти з різною колісною базою або висотою даху, при здебільшого незмінних силових агрегатах [1]. Подібний підхід, у поєднанні з поширеною практикою переобладнання вантажних LCV у пасажирські в процесі експлуатації, зумовлює виникнення невідповідності вихідних параметрів двигунів та трансмісії умовам експлуатації [2].

Одним із способів усунення такої невідповідності є коригування передаточних чисел коробок передач, особливо актуальне для пасажирських варіантів виконання, передусім на вищих передачах. Внаслідок чого можуть змінюватись показники експлуатаційних властивостей автомобіля, зокрема тягово-швидкісних, дослідження яких доцільно проводити не лише аналітичним способом, а і шляхом експериментальних досліджень.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз літературних джерел щодо оцінки експлуатаційних властивостей транспортних засобів виявляє різні підходи до проведення експериментальних досліджень для визначення показників їх тягово-швидкісних властивостей.

У роботі [3] наведено методику та результати натурних дорожніх випробувань легкового автомобіля з метою визначення показників тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності. Особливу увагу приділено інструментальному забезпеченню експерименту: для вимірювання швидкості, пройденого шляху та часу розгону до 100 км/год застосовувався вимірювально-реєструючий прилад із високочастотним GPS-приймачем. Встановлено, що похибка визначення часу розгону під час експерименту становила приблизно 7% у порівнянні з розрахунковими даними моделі.

У дослідженні [4] представлено практичний досвід проведення експериментальних заїздів автомобіля з дизельним двигуном під час руху за магістральним їздовим циклом. Для реєстрації кінематичних параметрів, зокрема швидкості та часу, а також миттєвої витрати палива, застосовано метод безперервної відеофіксації показників штатного бортового комп'ютера. Отримані результати підтвердили ефективність використання бортових інформаційних систем для оперативного збору телеметричних даних під час дорожніх випробувань.

Автори роботи [5] здійснили комплексне експериментальне дослідження тягово-швидкісних властивостей автобуса БАЗ-А079, переобладнаного в гібридний транспортний засіб. В ході дорожніх заїздів на горизонтальній ділянці визначались час розгону на відстані 400 м і 1000 м, а також максимальна швидкість руху для оцінки впливу глибокої модернізації силової установки.

Дослідження [6] присвячене дорожнім випробуванням автомобіля категорії М1, переобладнаного в батарейний електромобіль. Порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень показало розбіжність на рівні 3,5...14,8%.

У статті [7] представлено систему для експериментального дослідження кінематичних параметрів руху автомобіля. Автори детально аналізують процеси розгону транспортного засобу, зокрема перехідні режими під час переключання передач. Доведено, що параметри розгону суттєво залежать не лише від потужності двигуна, а й від тривалості та характеру процесів у трансмісії під час зміни вищих і нижчих передач.

У дослідженні [8] проведено порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних показників розгону автомобіля. Автори зазначають, що розрахункові значення часу розгону, визначені за швидкісною зовнішньою характеристикою двигуна, відрізняються від експериментальних, отриманих в умовах експлуатації, що зумовлює необхідність проведення натурних випробувань.

У роботі [9] обґрунтовано застосування інформаційно-вимірювальних систем на базі GPS для дослідження динамічних властивостей різних транспортних засобів в процесі експлуатації. Авторами розроблено методику експериментального отримання даних про прискорення та швидкість руху автомобілів. Доведено, що використання супутникової телеметрії дозволяє фіксувати показники тягово-швидкісних властивостей без застосування дороговартісного та складного обладнання та забезпечує достовірність результатів натурних випробувань та їх відповідність умовам експлуатації.

Дослідження [10] присвячене експериментальній оцінці поздовжніх прискорень міських та міжміських автобусів під час виконання розгонів та гальмувань. Шляхом реєстрації параметрів руху автори довели, що значення прискорень пасажирського транспорту суттєво залежать від стану дорожнього покриття та режимів руху, що доводить необхідність проведення дорожніх випробувань для визначення фактичної динаміки транспортних засобів.

Отже, аналіз літературних даних доводить необхідність проведення експериментальних досліджень шляхом дорожніх випробувань для визначення фактичних показників тягово-швидкісних властивостей легких комерційних автомобілів і подальшого підтвердження результатів математичного моделювання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є експериментальне визначення показників тягово-швидкісних властивостей легкого комерційного автомобіля у пасажирському варіанті виконання з модифікованою трансмісією. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі: обґрунтування методики проведення дорожніх випробувань та вибір комплексу вимірювального обладнання; експериментальне визначення показників тягово-швидкісних властивостей автомобіля (максимальної швидкості, часу і шляху розгону з місця до швидкості 100 км/год та до максимальної швидкості); оцінка впливу зміни маси автомобіля на його розгінну динаміку.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом експериментальних досліджень було обрано серійний легкий комерційний автомобіль Volkswagen Caddy третього покоління (Тур 2К) у пасажирському варіанті виконання з дизелем 1.6 TDI (рис. 1). Програмою досліджень передбачалося проведення дорожніх випробувань автомобіля з модифікованою трансмісією – преселективною роботизованою коробкою передач із подвійним зчепленням DSG DQ200 (0AM), у якій було змінено передаточні числа 4-ї, 5-ї, 6-ї та 7-ї передач.



Рисунок 1 – Об'єкт експериментальних досліджень Volkswagen Caddy

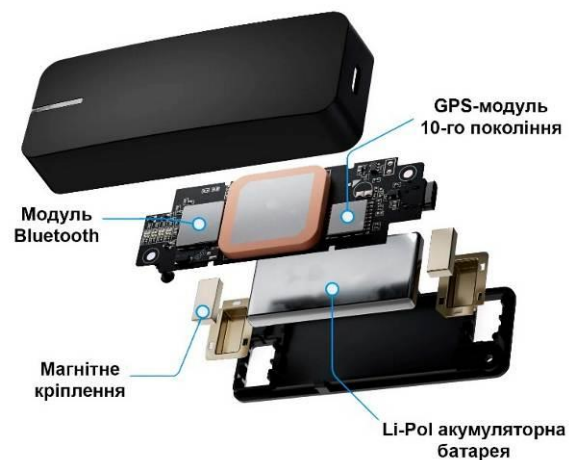
Для визначення впливу корисного навантаження на динаміку розгону, випробування проводилися у двох варіантах маси автомобіля: споряджена маса (з водієм та вимірювальним обладнанням) та повна маса (завантаження баластом до 2280 кг). Контрольне зважування автомобіля здійснювалося на стаціонарних автомобільних електронних тензометричних вагах моделі 80-18-К-П.

Умови проведення дорожніх випробувань відповідали вимогам Правил ЄЕК ООН № 68 [11]. Експериментальні дослідження проводилися на прямій горизонтальній ділянці автомобільної дороги М-03 з асфальтобетонним покриттям, на якій поздовжній ухил не перевищував 0,5 %. Для виключення впливу поздовжнього профілю дороги та напрямку вітру заїзди виконувалися у двох протилежних напрямках.

Фіксація параметрів руху здійснювалася за допомогою вимірювального комплексу високочастотної супутникової телеметрії Dragu Performance Meter, модель DRG69 (рис. 2). Прилад забезпечував реєстрацію миттєвої швидкості автомобіля, поздовжнього прискорення, поточних координат та часу руху з частотою дискретизації 10 Гц. Визначення пройденого шляху виконувалося розрахунковим методом на основі обробки масиву GPS-координат. Чисті дані від датчика прискорення згладжувались методом ковзного середнього (Moving Average) для фільтрації високочастотних апаратних шумів та вібрацій кузова [12].



а)



б)

Рисунок 2 – Вимірювальний комплекс супутникової телеметрії Dragu DRG69: а) установка на автомобілі; б) конструкція.

Випробування передбачали розгін автомобіля з місця до швидкості 100 км/год та до максимальної швидкості. Для забезпечення максимальної інтенсивності розгону педаль керування подачею палива утримувалася в натиснутому до упору положенні, а селектор трансмісії встановлювався в режим «S» (Sport).

За результатами роботи вимірювального комплексу супутникової телеметрії під час серії контрольних заїздів було отримано первинні масиви даних параметрів руху автомобіля.

На рисунках 3 та 4 наведено швидкісні характеристики розганяння автомобіля $V(\tau)$ та $V(S)$, побудовані за результатами експериментальних заїздів.

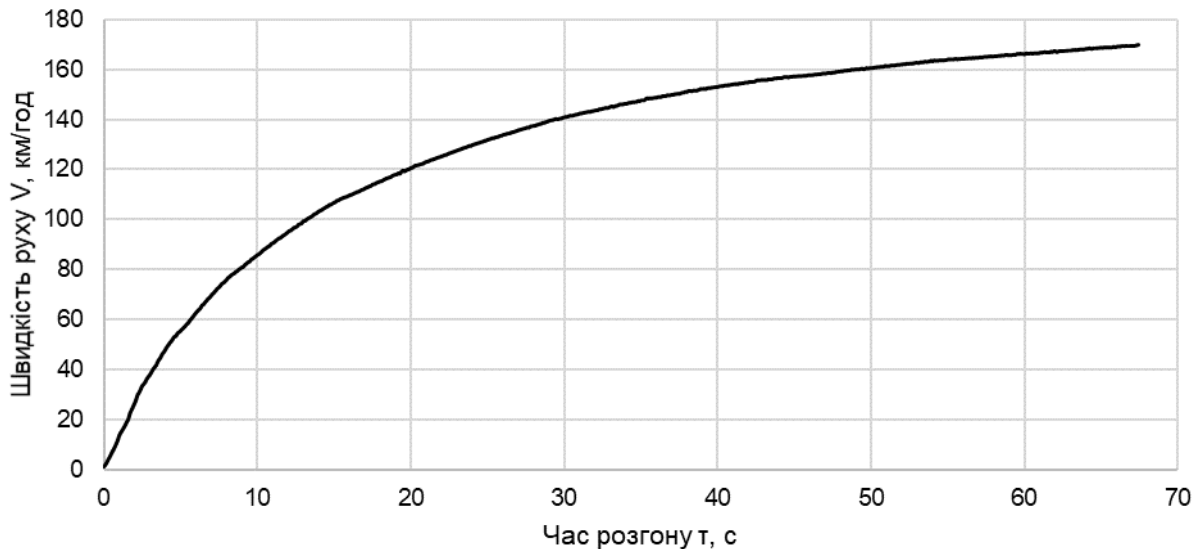


Рисунок 3 – Швидкісна характеристика розганяння $V(\tau)$

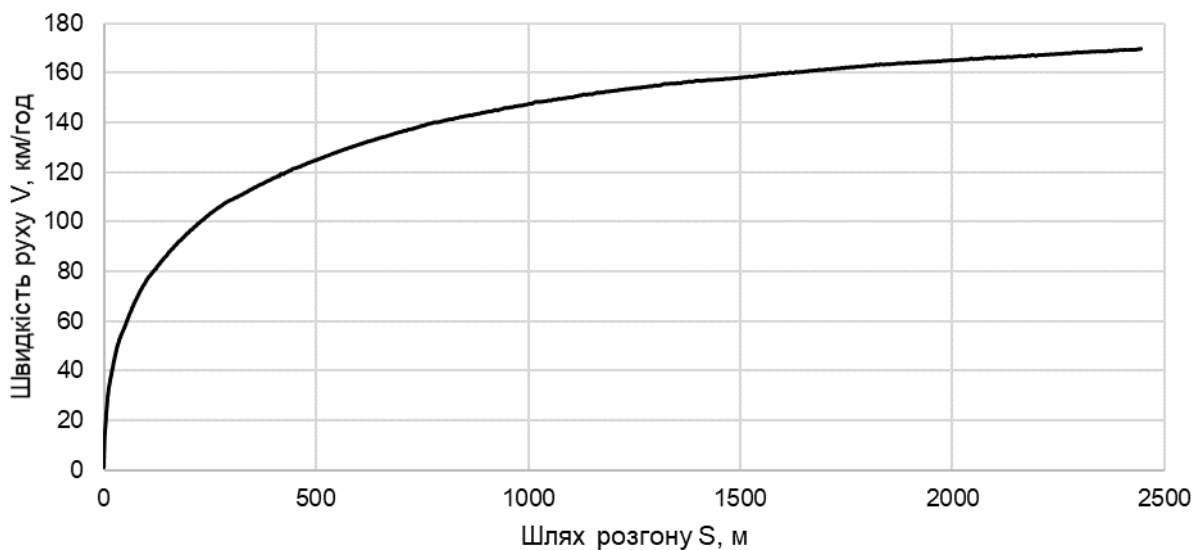
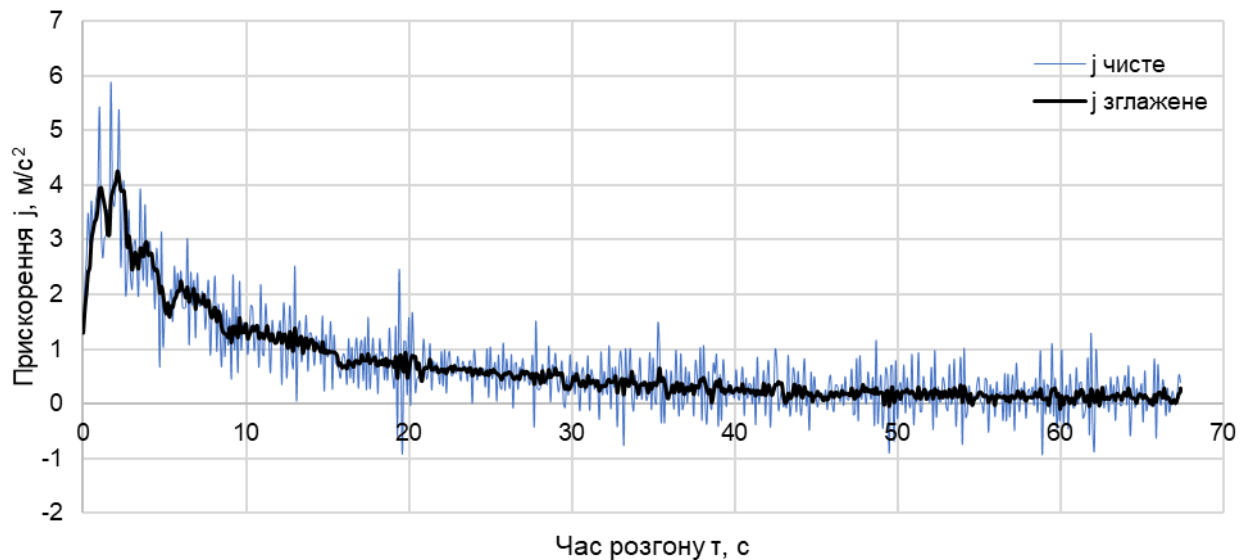


Рисунок 4 – Швидкісна характеристика розганяння $V(S)$

Як видно з графіків на рисунках 3 та 4, розгін автомобіля відбувається практично без розриву потоку потужності, що пояснюється використанням преселективної роботизованої коробки передач із подвійним зчепленням, у якої час переключання передач становить близько 0,2 с.

На рисунку 5 представлено залежність зміни поздовжнього прискорення j від часу розгону τ з відображенням як чистих експериментальних даних телеметрії, так і згладженої кривої.

Аналіз отриманої згладженої кривої дозволяє визначити моменти переключання передач за характерними локальними зниженнями значень прискорення. Відносно плавний характер цих спадів, без глибоких провалів, підтверджує високу швидкодію преселективної роботизованої коробки передач із подвійним зчепленням.

Рисунок 5 – Залежність поздовжнього прискорення від часу розгону $j(\tau)$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для оцінки показників тягово-швидкісних властивостей досліджуваного автомобіля було проаналізовано масиви даних, отриманих під час експерименту. Для визначення максимальної швидкості, а також часу і шляху розгону до неї, було виконано 6 контрольних заїздів у прямому та зворотному напрямках. Отримані результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень максимальної швидкості руху та часу і шляху розгону до неї.

№ заїзду	Максимальна швидкість, км/год	Час розгону до макс. швидкості, с	Шлях розгону до макс. швидкості, м
1	167,82	66,00	2376,62
2	170,01	67,40	2443,15
3	167,88	63,10	2241,97
4	168,97	68,10	2491,95
5	167,74	65,10	2352,07
6	169,25	68,70	2520,03
Середнє значення	168,61	66,40	2404,30

Аналіз отриманих результатів показує, що середня максимальна швидкість автомобіля становить 168,61 км/год. Варіативність значень часу (від 63,10 до 68,70 с) та шляху розгону (від 2241,97 до 2520,03 м) у різних заїздах зумовлена низкою об'єктивних чинників. Пряме порівняння часу та шляху розгону в цих заїздах є не зовсім коректним, оскільки розгін здійснювався до різних значень максимальної швидкості (від 167,74 до 170,01 км/год).

Така різниця граничних швидкостей і параметрів розгону пояснюється впливом зовнішніх неконтрольованих факторів (напрямок та сила вітру, мікроухил дороги, мікропрофіль дороги). Цей вплив стає особливо відчутним у реальних дорожніх умовах на режимах руху з високими, близькими до максимальних, швидкостями, де запас тяги автомобіля наближається до нуля. Падіння запасу тяги також підтверджується характером експериментальної кривої поздовжнього прискорення (рис. 5), яка закономірно знижується і асимптотично наближається до осі абсцис при досягненні максимальної швидкості.

Для оцінки динаміки розгону автомобіля з місця до швидкості 100 км/год та визначення впливу на неї корисного навантаження, було проаналізовано дані заїздів для двох варіантів маси: спорядженої з водієм та вимірювальним обладнанням (таблиця 2) та повної (таблиця 3).

На основі отриманих результатів було встановлено, що збільшення маси автомобіля від спорядженої разом з водієм та вимірювальним обладнанням до повної призвело до суттєвого погіршення показників тягово-швидкісних властивостей, так середній час розгону до швидкості 100 км/год зріс з 12,68 с до 17,03 с (на 34,3 %), а шлях розгону – з 217,87 м до 295,64 м (на 35,7 %). Такі

значні зміни доводять, що завантаження легких комерційних автомобілів в процесі експлуатації суттєво впливає на їхню динаміку розгону.

Таблиця 2 – Результати експериментального дослідження розгону автомобіля з місця до швидкості 100 км/год (споряджена маса з водієм та вимірювальним обладнанням)

№ заїзду	Час розгону до швидкості 100 км/год, с	Шлях розгону до швидкості 100 км/год, м
1	12,40	215,61
2	12,59	216,05
3	12,67	212,67
4	12,93	223,48
5	12,83	221,56
Середнє значення	12,68	217,87

Таблиця 3 – Результати експериментального дослідження розгону автомобіля з місця до швидкості 100 км/год (повна маса)

№ заїзду	Час розгону до швидкості 100 км/год, с	Шлях розгону до швидкості 100 км/год, м
1	17,29	303,81
2	17,49	300,17
3	16,46	285,08
4	16,86	293,50
Середнє значення	17,03	295,64

Отримані шляхом дорожніх випробувань показники тягово-швидкісних властивостей буде в подальшому використано для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі руху легкого комерційного автомобіля.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених дорожніх випробувань встановлено фактичні показники тягово-швидкісних властивостей легкого комерційного автомобіля Volkswagen Caddy у пасажирському варіанті виконання з модифікованою трансмісією. Підтверджено можливість застосування систем супутникової телеметрії для реєстрації параметрів розгінної динаміки.

Експериментально визначено параметри розгону досліджуваного автомобіля та встановлено, що середня максимальна швидкість склала 168,61 км/год. Для автомобіля зі спорядженою масою та масою водія і вимірювального обладнання час розгону з місця до швидкості 100 км/год склав 12,68 с, а шлях розгону – 217,87 м.

Оцінено вплив зміни маси автомобіля на його розгінну динаміку та встановлено, що збільшення маси до повної (2280 кг) призводить до зростання часу розгону до швидкості 100 км/год на 34,3 %, а шляху розгону – на 35,7 %.

Масив експериментальних даних, отриманий за результатами дорожніх випробувань, буде використано для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі руху легкого комерційного автомобіля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Корпач О.А. Аналіз варіантів виконання легких комерційних автомобілів (LCV) / О.А. Корпач, А.А. Трубенюк // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – №2(23). – С.115-125. – Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1533>
2. Корпач О.А. Вибір методу апроксимації швидкісної зовнішньої характеристики дизеля / О.А. Корпач, А.А. Трубенюк // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2025. – №1(24). – С.233-244. – Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1728>
3. Сахно В.П. Перевірка адекватності математичної моделі для визначення тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності автомобіля / В.П. Сахно, О.А. Корпач // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2013. – Випуск 28. – С. 415-423. – Режим доступу: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/415-423.pdf

4. Галушак Д. О. Перевірка адекватності математичної моделі системи «автомобіль з дизельним двигуном – дорога – навколишнє середовище» / Д. О. Галушак // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. – С. 1–7. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3729/426.pdf>
5. Луцик А. П. Експериментальне дослідження тягово-швидкісних властивостей автомобіля з гібридною силовою установкою / А. П. Луцик, О. Л. Ляшук, Д. В. Міронов // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : зб. наук. праць. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – С. 279–282. – Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/51840/2/ISTCYSS_2025_Lutsyk_A_P-Experimental_study_of_179-182.pdf
6. Гладченко В. С. Експериментальні дослідження переобладнаного колісного транспортного засобу категорії М1 в електромобіль / В. С. Гладченко // Системні технології. – 2021. – № 4 (135). – С. 34–42. – Режим доступу: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-03>
7. Ivanov Z. System for experimental study of kinematic parameters during car movement / Z. Ivanov, R. Dimitrov, D. Ivanov, V. Mihaylov, R. Wrobel, M. Andrych-Zalewska // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2868, Iss. 1. – A. 020027. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/5.0165631>
8. Rădulescu M. Experimental Study of the Car Acceleration, Equipped with on-Board Computer / M. Rădulescu, G. Ene, C. Mînzatu, M. Simionescu // Global Journal of Researches in Engineering. – 2014. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 23-28. – Режим доступу: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1061>
9. Lyubenov D. Application of GPS-based information system in studying dynamic properties of vehicles / D. Lyubenov; T. Balbuzanov; O. Dinolov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2570, Iss. 1. – A. 040004. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/5.0100026>
10. Frej D. Experimental study on longitudinal acceleration of urban buses and coaches in different road maneuvers / D. Frej, P. Grabski, R. Jurecki, E. Szumska // SAE Technical Paper. – 2023. – Vol. 23, Iss. 6. – A. 3125. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s23063125>
11. Regulation No. 68. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the measurement of the maximum speed : Revision 1. – Geneva : UN/ECE, 1987. – 15 p. – Режим доступу: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r068e.pdf>
12. Pranoto H. Real-Time Vehicle Emergency Braking Detection with Moving Average Method Based on Accelerometer and Gyroscope Data / H. Pranoto, A. Wahab, Y. Yoppy, M. Sudrajat, D. Mandaris, I. Supono, A. Ega, T. Wijanarko, H. Nugroho // Vehicles. – 2025. – Vol. 7, № 4. – Art. 106. – P. 1–15. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/vehicles7040106>

REFERENCES

1. Korpach, O. A., & Trubenok, A. A. (2024). Analiz variantiv vykonannya lehkykh komertsiiynykh avtomobiliv (LCV). *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(23), 115-125. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1533>
2. Korpach, O. A., & Trubenok, A. A. (2025). Vybir metodu aproksymatsii shvydkisnoi zovnishnoi kharakterystyky dyzelia. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(24), 233-244. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1728>
3. Sakhno, V. P., & Korpach, O. A. (2013). Perevirka adekvatnosti matematychnoi modeli dlia vyznachennia tiahovo-shvydkisnykh vlastyvostei ta palyvnoi ekonomichnosti avtomobilia. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 28, 415-423. http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/415-423.pdf
4. Halushchak, D. O. (2014). Perevirka adekvatnosti matematychnoi modeli systemy «avtomobil z dyzelnym dvyhunom – doroha – navkolyshnie seredovyshe». *Naukovi pratsi VNTU*, 4, 1-7. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3729/426.pdf>
5. Lutsyk, A. P., Liashuk, O. L., & Mironov, D. V. (2025). Eksperymentalne doslidzhennia tiahovo-shvydkisnykh vlastyvostei avtomobilia z hibrydnoi sylovoi ustanovkoiu. *Suchasni tekhnologii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu : zb. nauk. prats*, 279-282. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/51840/2/ISTCYSS_2025_Lutsyk_A_P-Experimental_study_of_179-182.pdf
6. Hladchenko, V. S. (2021). Eksperymentalni doslidzhennia pereobladnanoho kolisnogo transportnoho zasobu katehorii M1 v elektromobil. *Systemni tekhnologii*, 4(135), 34-42. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-03>
7. Ivanov, Z., Dimitrov, R., Ivanov, D., Mihaylov, V., Wrobel, R., & Andrych-Zalewska, M. (2023). System for experimental study of kinematic parameters during car movement. *AIP Conference Proceedings*, 2868(1), 020027. <https://doi.org/10.1063/5.0165631>
8. Rădulescu, M., Ene, G., Mînzatu, C., & Simionescu, M. (2014). Experimental Study of the Car Acceleration, Equipped with on-Board Computer. *Global Journal of Researches in Engineering*, 14(2), 23-28. <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1061>

9. Lyubenov, D., Balbuzanov, T., & Dinolov, O. (2022). Application of GPS-based information system in studying dynamic properties of vehicles. *AIP Conference Proceedings*, 2570(1), 040004. <https://doi.org/10.1063/5.0100026>

10. Frej, D., Grabski, P., Jurecki, R., & Szumska, E. (2023). Experimental study on longitudinal acceleration of urban buses and coaches in different road maneuvers. *SAE Technical Paper*, 23(6), 3125. <https://doi.org/10.3390/s23063125>

11. Regulation No. 68. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the measurement of the maximum speed : Revision 1. (1987). Geneva: UN/ECE. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r068e.pdf>

12. Pranoto, H., Wahab, A., Yoppy, Y., Sudrajat, M., Mandaris, D., Supono, I., Ega, A., Wijanarko, T., & Nugroho, H. (2025). Real-Time Vehicle Emergency Braking Detection with Moving Average Method Based on Accelerometer and Gyroscope Data. *Vehicles*, 7(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/vehicles7040106>

O. Korpach, A. Trubenok Experimental investigation of light commercial vehicle traction-speed properties

The article focuses on the experimental determination of the traction-speed properties of a light commercial vehicle in a passenger variant with a modified transmission for the further confirmation of the adequacy of the developed mathematical model of motion.

The features of the production and operation of modern light commercial vehicles are analyzed. It is established that the high degree of unification and the widespread practice of converting cargo variants into passenger ones results in a discrepancy between the parameters of powertrains and transmissions and the actual operating conditions. It is determined that one of the ways to eliminate such a mismatch is to modify the transmission gear ratios. Since such a modification affects the performance properties of the vehicle, there is a need to study its traction-speed properties through road tests.

The methodology of conducting experimental research using a measuring complex of high-frequency satellite telemetry with a sampling frequency of 10 Hz is proposed and applied. The experimental study involved a Volkswagen Caddy vehicle in a passenger variant, equipped with a dual-clutch transmission (DCT) with modified gear ratios of the higher gears. The test runs were performed for two mass variants: curb weight (including the driver and measuring equipment) and gross vehicle weight.

Based on the results of a series of test runs, the traction-speed properties were established. It is proven that an increase in the vehicle mass to the gross vehicle weight leads to a deterioration in the traction-speed properties: specifically, the acceleration time to a speed of 100 km/h increases by 34.3%, and the acceleration distance by 35.7%. An analysis of the smoothed curves of longitudinal acceleration confirmed that acceleration occurs with virtually no power interruption due to the high operating speed of the dual-clutch transmission.

Keywords: light commercial vehicle, experimental research, traction-speed properties, acceleration dynamics, road tests, satellite telemetry, transmission modification.

КОРПАЧ Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: korpach1988@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>

ТРУБЕНОК Андрій Анатолійович, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: andrey-akpp@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0003-5875-7647>

Oleksii KORPACH, PhD in Engineering, Associate professor, Associate professor Department of Automobiles, National Transport University, e-mail: korpach1988@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-2496-4395>

Andrii TRUBENOK, Postgraduate student, National Transport University, e-mail: andrey-akpp@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0003-5875-7647>

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.04.2026

<https://doi.org/10.36910/8bvgja63>

Крайник Л.В.¹, Рубан Д.П.¹, Сукач О.М.¹, Миронюк О.С.¹, Кубай О.С.², Пастернак А.Я.²
¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З.
Гжицького, Львів, Україна; ²Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та
будівництва, Львів, Україна

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ ШИНИ З ҐРУНТОВОЮ ПОВЕРХНЕЮ

У статті розглянуто питання агроєкологічної оцінки ущільнення ґрунту колесами машинно-тракторних агрегатів з урахуванням реальних умов їх взаємодії з деформівною опорною поверхнею. Показано, що існуюча нормативна база базується на значеннях площі плями контакту шин з жорсткою поверхнею за номінальних параметрів навантаження та тиску повітря, що не відображає фактичних умов роботи на ґрунтах. Обґрунтовано, що на ґрунтових поверхнях площа контакту є більшою та залежить від типу і стану ґрунту, навантаження на колесо та тиску повітря в шині.

На основі аналізу сучасних досліджень і результатів експериментальних вимірювань площі плями контакту поширених типорозмірів тракторних шин проведено оцінку емпіричних залежностей для розрахунку площі контакту шини з ґрунтом та їх зіставлення з експериментальними даними. Досліджено формування питомого тиску в зоні контакту, глибини колії та зміни цих показників при проходженні наступних осей.

Виконано аналіз впливу типорозміру шин, тиску повітря та навантаження на колесо на характеристики взаємодії з ґрунтами різної твердості, що оцінювалися за значенням конусного індексу *CI*. Отримані результати можуть бути використані для уточнення нормативних підходів до агроєкологічної оцінки впливу колісної техніки на ґрунтову опорну поверхню.

Ключові слова: машинно-тракторні агрегати, автомобілі, бездоріжжя, колесо, прохідність, пляма контакту, ущільнення ґрунту, агроєкологія, конусний індекс (*CI*), тиск повітря у шині, типорозмір шин.

ВСТУП

Актуальність розвитку повнопривідних автомобілів і аграрних машин для експлуатації в умовах бездоріжжя зумовлена як сучасними викликами у сфері транспорту, так і потребами сільського та лісового господарства. Існує значна потреба у мало- і середньотонажній колісній техніці, яка здатна ефективно працювати на деформівних опорних поверхнях за змінних умов навантаження, зчеплення та тиску в шинах, у тому числі з врахуванням умов національної безпеки і економії коштів (за прикладом і інших постсоціалістичних країн – членів НАТО, які активно розвивають виробництво власної колісної техніки). Досі в автопарку цього класу в Україні ще домінують автомобілі радянського виробництва. Очевидна і необхідність розвитку відповідної наукової школи, як бази дослідно - конструкторських робіт з розробки автомобілів цієї категорії з врахуванням тенденцій і змін, характерних для нового покоління військової автотехніки (ВАТ), поточний перехід, який здійснюється у європейських країнах.

Сучасні тенденції розвитку автомобільної техніки підвищеної прохідності передбачають використання науково обґрунтованих методів оцінки взаємодії колісних рушіїв з ґрунтовою поверхнею. У міжнародній практиці для таких задач широко застосовується методика WES, розроблена та впроваджена Інженерним корпусом армії США, яка базується на використанні інтегрального показника твердості опорної поверхні - конусного індексу (*CI*).

Застосування зазначеного підходу дозволяє здійснювати комплексну оцінку прохідності колісної техніки, прогнозувати глибину колії та питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, а також узгоджувати результати експериментальних і розрахункових досліджень. Методика WES використовується в країнах НАТО та відповідає сучасним вимогам до проєктування і експлуатації автомобілів та машин різноманітного призначення.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження прохідності автомобілів і, відповідно, оцінка взаємодії шин з деформівними опорними поверхнями в Україні розвивалися протягом другої половини XX століття. Зокрема з середини 1950-х і до початку 1980-х р.р. результати досліджень висвітлено в працях проф. Біруля А.І., проф. Безбородова Г.Б., проф. Кошарного М.Ф. [1-3], у роки Незалежності – щодо колісних тракторів в аспекті агроєкології – проф. Реброва О.Ю. [4]. У цей період було сформовано аналітичні підходи до опису процесів контакту колеса з ґрунтом, що ґрунтувалися на експериментальному визначенні фізико-механічних характеристик опорної поверхні. У подальшому ці підходи були адаптовані та розвинуті в наукових роботах, присвячених оцінці впливу колісних рушіїв на ґрунт, зокрема в аспекті агроєкології та експлуатації сільськогосподарської техніки.

Зазначені методики базувалися на використанні кількох показників, що характеризують опір вертикальній деформації ґрунту та його зсуву в горизонтальній площині, зокрема модуля деформації та параметрів міцності [4]. Такий підхід дозволяв детально описувати окремі складові взаємодії колеса з опорною поверхнею, проте потребував значних експериментальних витрат і складної процедури вимірювань.

Паралельно з цими дослідженнями у міжнародній практиці був сформований альтернативний підхід до оцінки прохідності та взаємодії рушіїв з ґрунтом. Ще до Другої світової війни Інженерним корпусом армії США була розроблена комбінована методика, що передбачає використання одного інтегрального показника твердості опорної поверхні - конусного індексу (CI). Цей показник отримав подальший розвиток у межах методики WES та був впроваджений у країнах НАТО, а також у цивільних сферах експлуатації техніки на бездоріжжі [7 - 8].

Використання конусного індексу, що визначається за допомогою стандартизованого конусного наконечника, забезпечує комплексну оцінку опорної поверхні з урахуванням одночасної дії вертикального стиску та зсуву ґрунту. Вказаний підхід є більш наближеним до реальних умов навантаження шини та регламентується міжнародним стандартом ISO [9], який застосовується і в національній нормативній базі України.

Механіка взаємодії еластичної шини з деформівною опорною поверхнею описується різними емпіричними залежностями, що базуються на використанні показників, які характеризують деформаційні властивості ґрунту або піску. Залежно від прийнятого підходу, у моделях враховуються як окремі фізико-механічні характеристики опорної поверхні, так і інтегральні показники, що поєднують ефекти стиску та зсуву [8, 11].

У класичній теорії руху автомобіля опір рухові і зчеплення шини з деформівною опорною поверхнею окрім звичного для доріг з твердим покриттям опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині $f_{ш}$ додатково формується [5, 6, 7] (рис. 1):

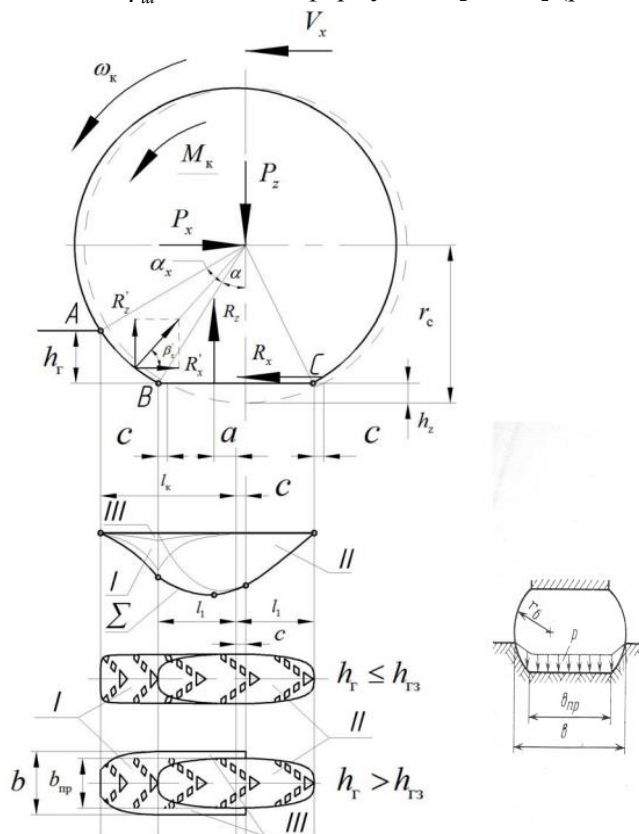


Рисунок 1 - Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом

- деформацією опорної поверхні та утворенням колії певної глибини f_z ;
- опором зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т.зв. бульдозерний ефект) f_o ;

- опором додаткових затрат енергії внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (екскалаційний ефект) f_E ;

- опором горизонтального зміщення верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (тиск відпаду) f_s ;

- для зв'язних вологих опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини f_n .

Практично аналогічні чинники формують і силу зчеплення шини з опорною поверхнею.

На рис.1 представлено схему взаємодії пневматичної шини колеса автомобіля з ґрунтом – опорною поверхнею [1 - 5], де: h_e – висота деформації ґрунту (глибина колії); h_{cz} – висота ґрунтозацепів (профілю шини); b – ширина колії; b_{np} – ширина протектора шини; M_k – крутний момент на колесі; V_x – лінійна швидкість осі колеса (автомобіля) у поздовжньому напрямі; ω_k – кутова швидкість обертання колеса; P_z – вертикальне навантаження на колесо; P_x – зусилля опору руху колеса, що передається на основу автомобіля;

Окрім сил P_z і P_x та крутного моменту M_k , що діють на колесо (рис.1), останнє взаємодіє у даному випадку з ґрунтом, що деформується під впливом цих сил. Відповідно, пляма – зона контакту шини з ґрунтом поділена на 3 зони (рис.1):

- перша область (дуга AB) у передній частині контакту, що позначена цифрою I – різної форми (на вигляді зверху, рис. 1 – залежно від співвідношення висоти ґрунтозацепів протектора h_{cz} та глибини деформації h_e);

- друга область (дуга BC) – зона взаємодії шини з плоскою зоною контакту з опорною поверхнею під дією вертикальної сили P_z та формування тягового зусилля R_x ;

- третя область (цифра III – на рис.1) появляється внаслідок контакту боковини шини з ґрунтом, коли величина нормальної деформації ґрунту/піску h_e перевищує висоту ґрунтозацепів протектора шини h_{cz} .

Практично коефіцієнт опору власне коченню колеса формується 2-ма складовими. Перша складова передбачає кочення еластичної шини у веденому режимі:

$$f_0 = \frac{(1 + 0,473 \times 10^{-3} \times V_x^2) \times (\alpha_f + \beta_f \cdot R_z^2)}{1 + p_w}; \quad (1)$$

де p_w – тиск повітря у шині, α_f і β_f – емпіричні коефіцієнти для даного типу шини.

Друга складова коефіцієнту опору коченню обумовлена передачею підведеного крутного моменту M_k :

$$f_m = \frac{\lambda_k \times M_k^2}{R_z \times r_{k0} \times r_k} \quad (2)$$

В межах другої зони контакту BC (рис.1) формується поздовжнє тягове зусилля R_x , величина якого визначається підведеним крутним моментом M_k та обмежується силою зчеплення – вертикальним навантаженням на колесо P_z , але це на твердій опорній поверхні, а тут частина P_z припадає і на зони деформації ґрунту I і III . На рис.1 показано відповідні епюри розподілу величин нормальних навантажень, віднесених до поздовжньої координати x (у т.ч. і у зоні II) та сумарна епюра розподілу навантажень. Відповідно в умовах опорної поверхні, що деформується, у зоні II діє не повна P_z , що відображається реакцією R_z (з врахуванням частини реакції опірної поверхні у зоні I):

$$R_z = P_z - R'_z. \quad (3)$$

Звідси, глибина колії h_z :

$$h_z = \frac{K_z \times (R_z)^{0,75}}{1 + 10 \times p_w}, \quad (4)$$

де: K_z – емпіричний коефіцієнт для даної моделі шини.

Очевидно, що практична реалізація цієї моделі ускладнена необхідністю додаткового визначення 3-х емпіричних показників для даної моделі шини. Окрім позитивного чинника – врахування тиску повітря в шині залишається, однак, відкритим питання врахування твердості опорної поверхні – ґрунту, що є одним з визначальних для формування глибини колії і не фігурує у (4). Окрім цього досить невизначеним залишається питання розрахунку коефіцієнтів опору руху колеса через деформацію і переміщення ґрунту, нагрівання ґрунту перед колесом (бульдозерний ефект), а для чорноземів – додатково і налипання ґрунту. Розрахунок цих показників базується на додатковому визначенні ще ряду емпіричних параметрів шини і ґрунту:

$$f_r = q_0 \times z \times 0,3 \times \left(\frac{B + B_1}{W_z} \right), \quad (5)$$

де: q_0 – тиск статичний, у роботі [4] – динамічний у контакті шини з опорною поверхнею; z – глибина колії; W_z – вертикальне навантаження на колесо; B_1 – ширина колії.

Тобто для розрахунку (5) необхідна також додаткова кількісна оцінка, окрім модуля E таких фізико-механічних характеристик опорної поверхні, як:

- кут внутрішнього тертя в ОП (ґрунті) φ_0 ;
- опір ґрунту зсуву;
- внутрішнє зчеплення у ґрунті C_0 .

Окрім цього необхідно і розрахувати питомий тиск у контакті шини з опорною поверхнею, а, відповідно і площу плями контакту. Залежності (5) обумовлюють необхідність попереднього розрахунку щодо оцінки значень питомого тиску q у контакті шини з поверхнею та глибини z і ширини B_1 утвореної колії:

$$q = 0,5 \times \delta_r \times \frac{P_{ш} + P_{к}}{B_1} \times \left(\frac{B}{H} + \frac{3H}{B} \right) \times \left(1 - \delta_r / B \right). \quad (6)$$

Звідси динамічне значення питомого тиску у контакті шини з опорною поверхнею:

$$q_0 = \frac{q}{1 + \frac{V_a}{2 \times \varphi_0 \times n \times l}} \quad (7)$$

$$q_0 = \frac{E \times z}{0,5 \times a \times (B + B_k) \times \arctg \left(\frac{H_r - z}{0,5 \times a \times (B + B_k)} \right)} + \frac{2E \times Z \times \arctg \left(\pi \frac{H_r - z}{(B + B_k)} \right)}{\pi \times q_s} \quad (8)$$

де q – статичний тиск у контакті шини з опорною поверхнею; $P_{ш}$ – тиск повітря у шині; $P_{к}$ – тиск на опорну поверхню залежно від жорсткості каркаса шини; δ_r – деформація шини на опорній поверхні; q_0 – динамічний тиск у контакті шини з опорною поверхнею; V_a – швидкість автомобіля; z – глибина колії; n – кількість осей; l – довжина поверхні контакту колеса з опорною поверхнею; f_r – товщина м'якого шару опорної поверхні; q_s – несівна здатність ґрунту; a – коефіцієнт зміни напружень в опорній поверхні за глибиною.

Взаємопов'язане з q і q_0 значення глибини колії z визначається спільним розв'язком рівнянь (6) - (8) та залежності [9]:

$$z = \left(\frac{W_z}{C_\Gamma \times F_{III} \times 10^6} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (9)$$

де C_Γ – коефіцієнт деформації ґрунту; F_{III} – площа плями контакту шини з ОП; γ – показник щільності ґрунту.

У свою чергу площа плями контакту F_{III} визначається спрощеним прямокутним контуром з ширини колії B_K та довжини плями контакту l і з врахуванням перерозподілу відомого вертикального навантаження на колесо W_z та деформаційних характеристик шини і опорної поверхні:

$$W_z = 0,25 \times \pi \times q \times \left[(1 - 0,5\xi) \times B \times 2\sqrt{D \times \delta - \delta^2} + \xi \times B_K \sqrt{D(\delta + z) - (\delta + z)^2} \right]. \quad (10)$$

Додаткові уточнювальні складові опору рухові від горизонтального зміщення опорної поверхні:

- бульдозерний ефект для гальмування та ведених коліс:

$$f_\delta = 0,5 \times \gamma \times q \times z \times \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right) + 2 \times C_0 \times \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right); \quad (11)$$

- ескалаційний ефект для ведучих коліс під час пробуксовування:

$$f_e = \frac{1,5 \times 10^6}{(\mu + 1)^{W_z}} \times \left[\frac{Z_\Pi \times (L_\Pi - e_\Pi)}{(1 - S_\delta) \times (0,5D - \delta) \times 2 \arcsin \frac{L_\Pi}{D}} \right]^{\mu-1} \times B_K \times C, \quad (12)$$

де Z_Π , L_Π , e_Π – висота, крок, ширина ґрунтозацепів протектора шини; C – безрозмірний емпіричний коефіцієнт опорної поверхні; S_δ – коефіцієнт пробуксовування колеса.

Ефект ескалації ґрунту супроводжується винесенням часток опорної поверхні із зони контакту і відповідним додатковим поглибленням колії ΔZ .

Прилипання частинок ґрунту або піску у впадинах протектора:

$$f_\Pi = 0,5 q_\Pi \times B \times \frac{L}{W_z}, \quad (13)$$

де q_Π – питома сила прилипання часток мокрої опорної поверхні до колеса.

Очевидно, що методика розрахунку сумарного опору рухові автомобіля на деформівних ґрунтових опорних поверхнях за багатопараметричними методиками є достатньо складною та потребує експериментального визначення несівної здатності ґрунту за кількома фізико-механічними показниками. Такий підхід характеризується значними трудовими витратами та обмеженою придатністю для оперативних інженерних оцінок.

Разом з тим більшість аналітичних залежностей, що використовуються для розрахунку опору коченню та деформації ґрунту або піску, мають переважно лінійний характер. Експериментальні дослідження показують, що за умов зниження тиску повітря в шинах до значень порядку 0,05–0,1 МПа залежності набувають виражено нелінійного характеру. Зазначений діапазон тиску є типовим для легких і надлегких автомобілів повною масою до 5–6 т, які становлять значну частку сучасного парку колісної техніки підвищеної прохідності, є явно нелінійними (рис. 2).

Важливим чинником формування опору деформації ґрунту є його тип і поточний стан, зокрема вологість, щільність та структурні особливості. У низці моделей цей вплив враховується опосередковано через визначення глибини колії (рис. 3) та побічно враховується у (5), однак без прямого врахування показників твердості опорної поверхні. Такий підхід може призводити до зниження точності розрахунків у змінних ґрунтових умовах.

У різних нормативно-методичних підходах до підбору та оцінки шин для колісної техніки застосовуються різні критерії та рівень деталізації розрахунків. Частина методик орієнтована на спрощені інженерні оцінки, що забезпечують прийнятний рівень практичної застосовності, але не завжди дозволяють всебічно оцінити вплив параметрів шини та стану опорної поверхні на прохідність.

У міжнародній практиці, зокрема в межах методики WES, яка використовується в країнах НАТО, реалізовано спрощений прикладний підхід з акцентом на оперативну оцінку прохідності місцевості та прогнозування потенційної швидкості руху колісної техніки. Вказаний підхід базується на інтегральних показниках і орієнтований на аналіз руху в реальних експлуатаційних умовах.

Водночас у ряді класичних інженерних моделей основна увага приділяється оцінці максимального тягового зусилля, яке може бути реалізоване на колісному русії за низьких швидкостей руху. Хоча такі показники є інформативними для окремих режимів роботи, вони мають обмежене застосування для оцінки ефективності руху бездоріжжям у широкому діапазоні швидкостей та не повною мірою відображають реальні умови експлуатації колісної техніки [10].

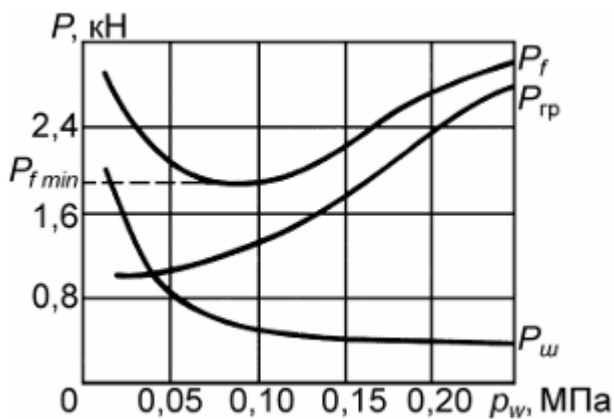


Рисунок 2 - Вплив тиску повітря у шинах p_w 14,00-18" на силу опору руху P_f на піску (де P_w — опір коченню шин, $P_{гр}$ — опір деформації ґрунту)

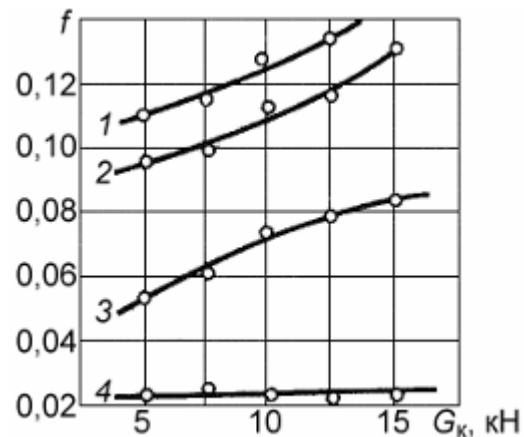


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта опору кочення f від навантаження на колесо G_k (12,00-18"):

1 — вологий суглинок; 2 — сухий пісок;
3 — ґрунтова дорога; 4 — асфальт

Попередня та послідовно деталізована оцінка взаємодії коліс військової автомобільної техніки з опорною поверхнею у країнах НАТО є стандартизованою та ґрунтується на поетапному підході, характерному для методики WES, що забезпечує оперативність оцінювання та достатню інженерну точність при аналізі потенційної прохідності.

На першому етапі здійснюється оцінка прохідності на основі експериментального визначення конусного індексу CI та базових геометричних і навантажувальних параметрів автомобіля, зокрема діаметра колеса D , його ширини B , а в окремих випадках — навантаження на колесо, висоти шини H та її радіальної деформації h_z . На підставі цих даних виконується розрахунок індексу мобільності (mobility number, MN), який є узагальненим показником потенційної прохідності конкретного зразка техніки.

Отримане значення MN використовується як вихідний параметр для вибору відповідних емпіричних моделей взаємодії шини з опорною поверхнею конкретного типу. Це дозволяє кількісно оцінити характеристики опору рухові та зчеплення коліс з ґрунтом у заданих умовах експлуатації.

На наступному етапі визначається глибина колії як інтегральний показник прохідності для даного типу техніки. Одночасно розраховується порогове значення конусного індексу VCI (Vehicle Cone Index), яке встановлюється на основі співвідношення між фактичним значенням CI опорної поверхні та індексом мобільності MN . Значення VCI використовується як критерій оцінки можливості руху техніки без втрати прохідності за заданих ґрунтових умов [6-11].

Щодо 6 різновидів однотипної емпіричної залежності з визначення індексу прохідності MN — залежність запропоновану D. Rowland [16], що використовується і у військових відомствах Англії та ФРН:

$$MN_R = \frac{CI \times B^{0,85} \times D^{1,15}}{W} \sqrt{\frac{\delta}{B}}, \quad (14)$$

де CI – значення конусного індексу, МПа; W – вага автомобіля, т; D, B – діаметр і ширина шин, м; δ – деформація шини під номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні, або більш просту залежність D . Freitag з корекцією, введеною у практику інженерним корпусом армії США [15].

$$MN_F = \frac{CI \times B \times D}{W} \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{B}{2D}} \right), \quad (15)$$

де h_z – радіальна деформація шини на твердій ОП під дією вертикального навантаження на колесо, м; H_T – висота шини, (різниця зовнішнього та внутрішнього діаметрів), м.

Відповідно теоретична оцінка глибини колії на опорній поверхні визначається [9]:

$$z = \left(0,003 + \frac{0,287}{MN_F} \right) \times D \quad \text{або} \quad z = \left(-0,001 + \frac{0,248}{MN_R} \right) \times D. \quad (16)$$

Остання є визначальною для комплексного розрахунку відповідно до коефіцієнтів зчеплення μ та сумарного опору рухові шини без врахування мікропрофілю місцевості, відповідно при використанні MN_F [9]:

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_F - 2,45} + \frac{0,2}{MN_F - 2,5} \quad \text{та} \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \quad (17)$$

або при використанні MN_R :

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_R - 0,95} + \frac{0,2}{MN_R - 1,35} \quad \text{та} \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_R - 1,35}. \quad (18)$$

Як свідчить аналіз відомих досліджень власне залежності (17) - (18) забезпечують кращу збіжність результатів розрахунку та дорожніх випробувань насамперед на ґрунтових опорних поверхнях.

Вищевикладені основні положення WES-методики покладені і в основу нормативної бази Об'єднання німецьких інженерів (VDI) щодо проектування та експлуатації колісних та гусеничних машин в умовах бездоріжжя – аграрних угідь [16]. Дана методологія використовується також в ЄС, США і інших країнах і агроекологічної оцінки автомобілів і тракторів у сільському та лісовому господарстві [22 - 25].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Актуальність розвитку в Україні власного виробництва мало- і середньотонажної автотехніки підвищеної прохідності як з умов національної безпеки, оновлення застарілого автопарку ЗСУ, так і розвитку сільськогосподарського та лісового господарства є очевидною і практично можливою (у т.ч. і з реалій інших постсоціалістичних країн). У цьому плані базою відповідних дослідно-конструкторських робіт є опрацювання сучасних методичних засад оцінки динаміки та енергозатратності руху колісних машин бездоріжжям.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В основі теорії руху колісної техніки бездоріжжям лежить опис і моделювання взаємодії пневматичних шин з деформівною опорною поверхнею, зокрема ґрунтовою або піщаною. Ефективність моделювання значною мірою визначається вибором показників, які використовуються для характеристики фізико-механічних властивостей опорної поверхні.

У цьому контексті методика WES має суттєві переваги, оскільки для оцінки властивостей ґрунту або піску достатньо визначення одного інтегрального показника - конусного індексу (CI). Використання CI дозволяє оперативно оцінювати несівну здатність опорної поверхні та застосовувати узагальнені емпіричні залежності для прогнозування прохідності і глибини колії. На відміну від цього, багатопараметричні підходи потребують трудомісткого експериментального визначення кількох фізико-механічних характеристик ґрунту із застосуванням різного вимірювального обладнання, у багатьох випадках вимірювання виконуються в умовах стаціонарних лабораторій, що обмежує можливість їх оперативного застосування безпосередньо в польових умовах. Це істотно ускладнює використання багатопараметричних методик для швидкої інженерної оцінки прохідності колісної техніки за змінних характеристик ґрунтової опорної поверхні та мінливих погодних умов.

Слід зазначити, що результати дослідження із застосуванням WES-методики [17] обмежено представлені для окремих типів ґрунтів, зокрема чорноземів, які є домінуючими в Україні. Це зумовлює необхідність адаптації та уточнення наявних моделей з урахуванням специфіки ґрунтових опорних поверхонь.

Для оцінки адекватності теоретичного розрахунку коефіцієнтів сумарного опору руху f та зчеплення μ колеса з ґрунтовою поверхнею з відомим значенням CI згідно (17), що використовується в армії США, були проведені експериментальні заїзди повнопривідної вантажівки КамАЗ 4310 (табл.1) для 2-х вагових станів та 4-х значень регульованого тиску повітря у шинах при русі з постійною швидкістю 20 км/год. Шини стандартні – 425/85R20 з діапазоном зміни тиску повітря 0,1 – 0,4 МПа.

Таблиця 1 - Маса та розподіл навантажень на осі КамАЗ 4310

Ваговий стан	Маса автомобіля, кг	Розподіл навантажень на осі, кг		
		Передня вісь	Середня	Задня вісь
споряджена	8715	4315	2220	2210
повна	15100	4910	5095	5095

Випробування проводились на типовому для заходу України суглинку - зоране поле з перепадом висот профілю в діапазоні 5-10 см та вмістом води 31%. Твердість ґрунту CI на глибині 10 см у діапазоні 440-480 кПа (20 замірів у різних місцях ділянки твердоміром ЛАН-М PRO [20] з зміненням конусним наконечником під вимоги WES –методики [18, 20] та відповідним таруванням програмного блоку приладу). Довжина ділянки фіксації даних – 50 м з здійсненням проїздів на відстані 40-50 см від колії попередніх проїздів. Комплекс вимірювальної апаратури описаний у [10]. Додатково фіксувалось положення педалі паливоподачі – рейки паливного насоса високого тиску, що при усталеній швидкості руху 20 км/год та фіксації частоти обертання вала двигуна дозволило за відомою регуляторною характеристикою двигуна КамАЗ-740 визначити орієнтовний крутний момент, що передається через включену другу понижену передачу трансмісії на колеса для переборення опору рухові. Радіальна деформація шини h_z на бетонній поверхні для навантажень спорядженої маси та повного завантаження була визначена при 4-х значеннях тиску повітря у шині.

Паралельно проведені і комп'ютеризовані розрахунки значень опору руху у програмному середовищі MATLAB Simulink за опрацьованою моделлю щодо КамАЗ 4310 [21, 24] з розмежуванням значень по осях. (При цьому, однак, задавалось опосередковане значення твердості ґрунту $CI = 460$ кПа та не враховувались вищезгадані стохастичні перепади висот профілю поверхні ґрунту). Відхилення значень отриманих експериментально – розрахунково та шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання є достатньо відчутні – у межах 7-15%, але цілком прийнятні і зрозумілі. Отриманий рівень збіжності результатів можна вважати прийнятним для інженерних оцінок і подальшого аналізу взаємодії колісної техніки з деформівною опорною поверхнею, враховуючи реалії прийнятих спрощень та відмінностей між теоретично еталонною регуляторною характеристикою двигуна і реальною в експлуатації з пробігом автомобіля понад 110 тис. км.

Узагальнені отримані залежності сумарного опору коченню коліс усіх трьох осей автомобіля представлені на рис.4.

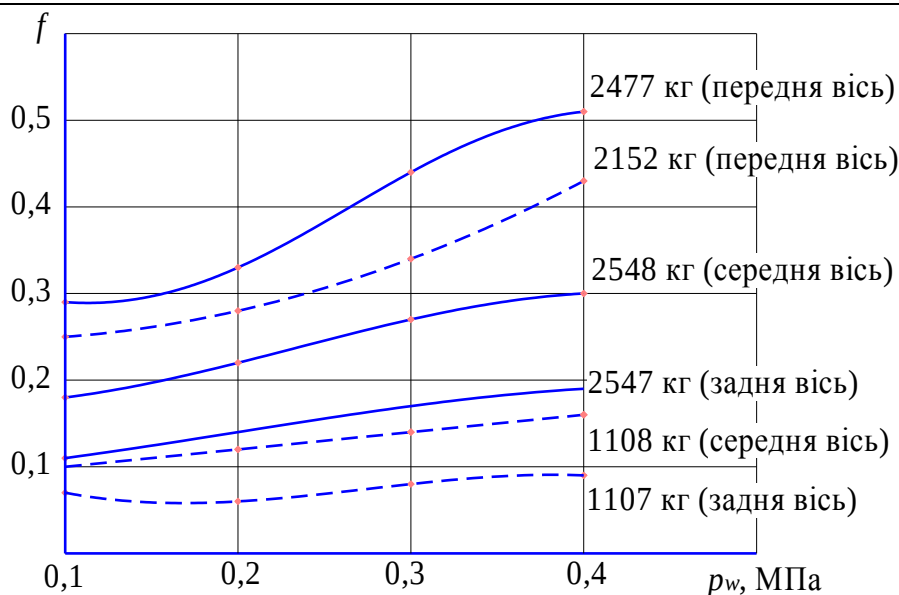


Рисунок 4 – Закономірності зміни коефіцієнта опору коченню коліс осей автомобіля залежно від навантаження на колесо та тиску повітря у шинах p_w

Найбільші відхилення між експериментальними даними та результатами імітаційного комп'ютеризованого моделювання (12-15%) зафіксовані для спорядженого стану автомобіля. Такі розбіжності зумовлені особливостями задання параметрів ущільнення опорної поверхні в комп'ютерній моделі після проходження передньої осі. Зокрема, у розрахунках використовувалися табличні залежності WES-методики [10], що визначалась для повної маси автомобіля і рівномірного розподілу навантажень по осях.

Зазначена невідповідність умов моделювання реальному експерименту пояснює підвищені відхилення результатів і водночас підтверджує чутливість розрахункових моделей до параметрів навантаження та ступеня ущільнення опорної поверхні.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Насамперед слід відзначити суттєву залежність опору руху коліс на глинистих ґрунтах, що деформуються, від тиску повітря у шинах. Як видно з рисунку 4, для коліс передньої осі ця залежність є найбільш вираженою та практично не залежить від загального завантаження автомобіля. Зміна коефіцієнта опору руху в діапазоні 1,6–1,8 раза свідчить про визначальний вплив тиску в шинах на характер напружено-деформованого стану ґрунту в зоні контакту. Це пояснюється зміною площі плями контакту та розподілу нормальних напружень у ґрунті. Зменшення тиску в шині призводить до збільшення площі контакту та зниження питомого тиску, що зменшує глибину колії та опір деформації. Разом з тим надмірне зниження тиску супроводжується зростанням втрат енергії на внутрішню деформацію шини та підвищенням чутливості до нерівностей мікропрофілю. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними інших досліджень [16].

З подальшим ущільненням колії після проходження попередніх осей характер взаємодії змінюється. Для третьої за послідовністю осі при спорядженій масі автомобіля спостерігається зміщення оптимального значення тиску повітря в шинах з 0,1 МПа до 0,15–0,2 МПа (рис. 4). Це пов'язано зі зростанням несучої здатності ущільненої опорної поверхні та відповідною зміною співвідношення між деформацією ґрунту і деформацією шини. Отримані результати підтверджують доцільність роздільного регулювання тиску в шинах по осях залежно від навантаження та ступеня ущільнення опорної поверхні, що узгоджується з положеннями [22].

У межах WES-методики основний акцент зроблено на використанні конусного індексу CI для оцінки прохідності та глибини колії, тоді як геометричні параметри плями контакту безпосередньо не деталізуються. Проте саме площа контакту визначає величину питомого тиску на ґрунт, що є ключовим показником при агроекологічній оцінці впливу колісної техніки на ґрунтовий покрив.

Характер взаємозв'язку між конусним індексом CI , навантаженням на колесо та площею контакту може бути встановлений аналітично. Використання значень конусного індексу дозволяє оцінити несівну здатність ґрунту та визначити необхідну площу контакту для забезпечення

допустимого рівня тиску. Відповідні підходи наведені у [19, 21] і дають можливість адаптувати розрахунок до конкретного типу та стану ґрунту.

Застосування WES-методики, доповненої аналітичною оцінкою площі контакту забезпечує більш повну характеристику взаємодії колісної техніки з деформівною опорною поверхнею як з умови прохідності, так і агроекології.

ВИСНОВКИ

Дослідження та аналітичний опис взаємодії пневматичної шини колісної техніки з ґрунтом набувають особливої актуальності в Україні не тільки в аспекті поточної війни, але й необхідності розвитку власного промислового виробництва сучасної військової автотехніки для бездоріжжя, зумовленим зростанням інтенсивності використання машин у сільському та лісовому господарстві. Поширення важких машинно-тракторних агрегатів супроводжується підвищенням навантаженням на ґрунт покрив, що загострює проблему переуцільнення та деградації сільськогосподарських угідь.

У цьому контексті доцільним є акцент на оцінці опорних поверхонь на основі показників твердості ґрунту, зокрема конусного індексу, а не лише показників його щільності, які традиційно застосовуються в аграрній практиці. Такий підхід є більш адекватним в контексті механіки взаємодії рушія з деформівною опорною поверхнею та відповідає сучасним інженерним дослідженням механізмів формування питомого тиску і глибини колії.

Використання показника твердості ґрунту узгоджується з міжнародною практикою та нормативними документами, зокрема стандартами ISO [11], що застосовуються у транспортних і геотехнічних дослідженнях. У зв'язку з цим доцільним є впровадження відповідних методик як національного стандарту ДСТУ. Застосування застарілих багатопараметричних підходів до опису фізико-механічних характеристик опорних поверхонь у задачах взаємодії з пневматичними шинами та гусеничними рушіями істотно ускладнює інженерні розрахунки та не забезпечує необхідної швидкості й ефективності досліджень в сучасних умовах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Завгородний А. М., МIRONЕНКО В. І., СЕРГІЄНКО Н. Є. Оцінка опорної прохідності автомобілів. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2012. № 60 (966). С. 81–91.
2. Кошарний Н. Ф. Техніко-експлуатаційні властивості автомобілів високої прохідності. Київ : Вища школа, 1981. 208 с.
3. Ребров О. Ю., Кальченко Б. І., Макаров В. А., Якунін М. С., Бучко І. Г., Реброва О. М., Артющенко О. В., Леленко О. М. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2022. № 1. С. 36–43.
4. Ребров О. Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробки ґрунту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 423 с.
5. Гащук П. Автомобіль: теорія колісного рушія : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2018. 328 с.
6. Wong J. Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering. 2nd ed. London : Butterworth-Heinemann, 2010. 482 p.
7. Wong J. Y. Theory of ground vehicles. New York : McGraw-Hill, 1993. 423 p.
8. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів : монографія. Київ : Професіонал, 2023. 182 с.
9. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. Geneva : ISO, 2012.
10. Волонцевич Д. О., Веретенников Є. А., Костяник І. В., Пасічний С. С., Воронцов С. М., Пильова Т. К. До питання оптимізації передаточних чисел планетарної коробки передач бронетранспортера БТР-4. Механіка та машинобудування. 2014. № 1. С. 75–82.
11. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Андрієнко А. М. Основи формування національної нормативної бази щодо прохідності колісної військової автомобільної техніки. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 2 (62). С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.01>.
12. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник. Суми : Університетська книга, 2019. 320 с.

13. ДСТУ 8815:2018. Шини пневматичні для вантажних колісних транспортних засобів та причепів до них. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
14. Rowland D., Peel J. W. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1975. No. 205. P. 81–92.
15. Freitag D. R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *Journal of Terramechanics*. 1966. Vol. 3, No. 3. P. 51–68.
16. VDI 6101. Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Düsseldorf : VDI Verlag, 2007. 39 S.
17. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка автомобілів і тракторів на базі WES-методології. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021 : матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 118–120.
18. Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агроінженерні дослідження*. 2024. № 28. С. 209–216.
19. Стиранівський О. А., Стиранівський Ю. О. Показники екологічної сприйнятливості трелювання деревини. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2007. Вип. 17.4. С. 83–90.
20. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS : вебсайт. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 12.11.2025р.).
21. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. № 2. С. 21–28.
22. Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 22–26.
23. Сивулька П., Сукач О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 1 (24). С. 399–408. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>.
24. Бешун О. А., Ачкевич В. І., Меланченко Я. Д., Шеремет Д. О. Аналіз існуючих моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею. *Machinery & Energetics*. 2018. № 282. С. 395–404.
25. Медведєв В. В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*. 2010. № 4. С. 14–18.

REFERENCES

1. Zavhorodnyi, A. M., Myronenko, V. I., & Serhiienko, N. Ye. (2012). Otsinka opornoї prokhidnosti avtomobiliv. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (60(966)), 81–91.
2. Kosharnyi, N. F. (1981). *Tekhniko-ekspluatatsiini vlastyvosti avtomobiliv vysokoi prokhidnosti*. Kyiv: Vyshcha shkola.
3. Rebrov, O. Yu., Kalchenko, B. I., Makarov, V. A., Yakunin, M. S., Buchko, I. H., Rebrova, O. M., Artiushenko, O. V., & Lelnenko, O. M. (2022). Otsinochnyi analiz dii na grunt khodovykh system kolisnykh silskohospodarskykh traktoriv. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (1), 36–43.
4. Rebrov, O. Yu. (2021). *SCientific substantiation of increasing the effiClency of wheeled propulsion systems of agricultural tractors during energy-intensive soil tillage operations* (Doctoral dissertation). National Technical University “KhPI”, Kharkiv, Ukraine.
5. Hashchuk, P. (2018). *Avtomobil: teoriia kolisnoho rushiia*. Kyiv: Kondor.
6. Wong, J. Y. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering* (2nd ed.). London: Butterworth-Heinemann.
7. Wong, J. Y. (1993). *Theory of ground vehicles*. New York, NY: McGraw-Hill.
8. Hrubel, M. H., & Krainyk, L. V. (2023). *Prokhidnist viiskovykh avtomobiliv*. Kyiv: Profesional.
9. International Organization for Standardization. (2012). *ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test*. Geneva: ISO.
10. Volontsevykh, D. O., Veretennykov, Ye. A., Kostianyk, I. V., Pasichnyi, S. S., Vorontsov, S. M., & Pylova, T. K. (2014). Do pytannia optymizatsii peredatochnykh chysel planetarnoi korobky peredach bronetransportera BTR-4. *Mekhanika ta Mashynobuduvannia*, (1), 75–82.

11. Hrubel, M. H., Krainyk, L. V., & Andriienko, A. M. (2020). Osnovy formuvannia natsionalnoi normatyvnoi bazy shchodo prokhidnosti kolisnoi viiskovoi avtomobilnoi tekhniki. *Systemy Ozbroyennia i Viiskova Tekhnika*, 2(62), 7–17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.01>
12. Volkov, V. P., & Vilskyi, H. B. (2019). *Teoriia rukhu avtomobilia*. Sumy: Universytetska knyha.
13. UkrNDNTs. (2018). *DSTU 8815:2018. Pneumatic tires for trucks and trailers. General specifications*. Kyiv: DP “UkrNDNTs”.
14. Rowland, D., & Peel, J. W. (1975). Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, (205), 81–92.
15. Freitag, D. R. (1966). A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *Journal of Terramechanics*, 3(3), 51–68.
16. Verein Deutscher Ingenieure. (2007). *VDI 6101: Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden*. Düsseldorf: VDI Verlag.
17. Krainyk, L., & Syvulka, P. (2021). Ahroekolohichna otsinka avtomobiliv i traktoriv na bazi WES-metodolohii. In *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference “Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia ta transportu – 2021”* (pp. 118–120). Vinnytsia: VNTU.
18. Syvulka, P. (2024). Porivnialnyi analiz metodyk ahroekolohichnoi otsinky mashynno-traktornykh ahrehativ v Ukraini ta krainakh YeS. *Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho Universytetu Pryrodokorystuvannia. Serii: Ahroinzhenerni Doslidzhennia*, (28), 209–216.
19. Styranivskiy, O. A., & Styranivskiy, Yu. O. (2007). Pokaznyky ekolohichnoi spryiniatlyvosti treliuvannia derevyny. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy*, 17(4), 83–90.
20. Spectrolab. (n.d.). LAN-M PRO soil penetrometer with GPS. <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html>
21. Hrubel, M. H., Krainyk, L. V., & Khoma, V. V. (2020). Imitatsiine modeliuвання rukhu kolisnoi viiskovoi avtomobilnoi tekhniki bezdorozhzhiam ta otsinka yoho adekvatnosti. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (2), 21–28.
22. Khoma, V. (2023). Efektyvnist rozdilnoho rehuliuвання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності ґрунту бездорозьжям. *Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho Universytetu Pryrodokorystuvannia. Serii: Ahroinzhenerni Doslidzhennia*, (27), 22–26.
23. Syvulka, P., & Sukach, O. (2025). Otsinka ploshchi pliama kontaktu shyny na gruntovykh poverkhniah. *Suchasni Tekhnologii v Mashynobuduvanni ta Transporti*, 1(24), 399–408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>
24. Beshun, O. A., Achkevych, V. I., Melanchenko, Ya. D., & Sheremet, D. O. (2018). Analiz isnuichykh modelei vzaємodii kola z opornoiu poverkhnieu. *Machinery & Energetics*, (282), 395–404.
25. Medvediev, V. V. (2010). Tverdist ґрунту yak kryterii dlia obgruntuvannia tekhnologii tekhnichnykh zasobiv z yoho obrobittu. *Visnyk Ahrarnoi Nauky*, (4), 14–18.

Krainyk L.V., Ruban D.P., Sukach O.M., Muronyuk O.S., Kubai O.S., Pasternak A.Ya. Analytical assessment of the interaction between tyre and ground surface

The paper addresses the agroecological assessment of soil compaction caused by the wheels of machine–tractor aggregates, taking into account real operating conditions of their interaction with deformable supporting surfaces. It is shown that the existing regulatory framework is based on tire contact patch areas determined on rigid surfaces under nominal wheel loads and inflation pressures, which does not adequately reflect actual operating conditions on soils. It is substantiated that on soil surfaces the contact area is larger and depends on soil type and condition, wheel load, and tire inflation pressure.

Based on an analysis of recent studies and the results of experimental measurements of the contact patch area for commonly used tractor tire sizes, empirical relationships for calculating the tire–soil contact area were evaluated and compared with experimental data. The formation of contact pressure, rut depth, and changes in these parameters during the passage of subsequent axles were also investigated.

An analysis was performed of the influence of tire size, inflation pressure, and wheel load on the characteristics of interaction with soils of different hardness, assessed using the cone index (CI). The obtained results can be used to refine regulatory approaches to the agroecological assessment of the impact of wheeled machinery on the soil supporting surface.

Keywords: machine–tractor aggregates, vehicles, off-road conditions, wheel, mobility, contact patch, soil compaction, agroecology, cone index (CI), tire inflation pressure, tire size.

КРАЙНИК Любомир Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: l.krainyk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

РУБАН Дмитро Петрович, доктор технічних наук, в.о. професора кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: ruban_dimon@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0671-3226>

СУКАЧ Олег Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

МИРОНЮК Олег Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: muronjuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8997-6509>.

КУБАЙ Орест Степанович, викладач, Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та будівництва, e-mail: or4uk80@gmail.com

ПАСТЕРНАК Андрій Ярославович, викладач, Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та будівництва, e-mail: pasternachok@gmail.com

Lybomyr KRAINIK, doctor of technical sciences, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine, e-mail: l.krainyk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

Dmytro RUBAN, doctor of technical sciences, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine, e-mail: ruban_dimon@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0671-3226>

Oleh SUKACH, candidate of technical sciences, associate professor, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

Oleh MURONYUK, candidate of technical sciences, associate professor, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine, e-mail: muronjuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8997-6509>

Orest KUBAI, teacher, Lviv Higher Vocational School of Computer Technologies and Construction, e-mail: or4uk80@gmail.com

Andrii PASTERNAK, teacher, Lviv Higher Vocational School of Computer Technologies and Construction, e-mail: pasternachok@gmail.com

Дата надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

<https://doi.org/10.36910/07wmtd74>

Краснокутський В. М.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕДНЬОЇ НАВІСНОЇ СИСТЕМИ НА ТРАКТОРНОМУ САМОХІДНОМУ ШАСІ ЯК ЕЛЕМЕНТУ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО УНІВЕРСАЛЬНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ

Сучасний розвиток сільського господарства та комунальної інфраструктури вимагає застосування ефективної, економічно доцільної та екологічно безпечної техніки. Одним із найперспективніших напрямів у механізації малих господарств та міських служб є використання універсальних тракторних самохідних шасі, які поєднують маневреність, простоту експлуатації та мінімальні експлуатаційні витрати. У зв'язку зі зростанням вартості палива та підвищенням вартості великих енергонасичених колісних тракторів та експлуатаційних витрат на їх утримання. Тракторні самохідні шасі стають конкурентоздатною альтернативою традиційним тракторам.

Тракторні самохідні шасі, що належать до тягового класу 0,6 (6 кН), мають компактні габарити, достатню потужність та універсальність у використанні. Це робить їх ефективним для виконання широкого спектра робіт у фермерських господарствах малого масштабу, приватних садибах, тепличних комплексах, а також у комунальних підприємствах – для прибирання територій, догляду за зеленими зонами, транспортування невеликих вантажів та виконання сезонних робіт. Проте базове оснащення тракторного самохідного шасі обмежує його потенційну функціональність, що створює потребу у розширенні набору змінного робочого обладнання.

Одним із ключових елементів, що суттєво підвищує універсальність і ефективність тракторного самохідного шасі, є передня навіска. Її наявність дозволяє агрегувати широкий спектр обладнання: від щіток і відвалів для прибирання вулиць до фрез, косарок і підйомних пристроїв для сільськогосподарських потреб. Сучасні вимоги до навісних систем передбачають підвищену надійність, можливість швидкої зміни обладнання, сумісність із силовими характеристиками тракторного самохідного шасі та забезпечення безпечних умов роботи оператора.

Ключові слова: тракторне самохідне шасі; передня навіска; тяговий розрахунок; навісна система; конструкція; проектування.

ВСТУП

Актуальність теми статті полягає у необхідності створення ефективної та універсальної передньої навісної системи, яка відповідатиме технічним можливостям тракторного самохідного шасі (ТСШ) та розширюватиме його функціональність у реальних умовах експлуатації малих фермерських та міських господарств. Впровадження такої конструкції сприятиме підвищенню продуктивності праці, зниженню витрат на обслуговування техніки, а також розвитку екологічно чистих технологій в аграрному та комунальному секторах України.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Науковими аспектами розвитку ТСШ займалися М. А. Подригало, О. Г. Закопко, А. С. Полянський, М. П. Артьомов та інші.

Метою статті є розробка передньої навіски для ТСШ тягового класу 0,6 (≈ 6 кН). Проведено моніторинг існуючих навісних систем та аналіз їх конструктивних особливостей. Описано конструктивні особливості ТСШ та визначено вимоги до передньої навіски. Виконано розрахунок основних елементів передньої навісної системи. Розроблено конструкцію передньої навіски та виконано необхідні розрахунки міцності й працездатності. Підготовано робочі креслення.

Призначення та сфери застосування передньої навіски

Використання передньої навіски підвищує продуктивність ТСШ, універсальність його застосування та дозволяє оптимізувати робочі процеси без залучення додаткової техніки.

Малі габарити та маневреність дають можливість застосовувати ТСШ усередині теплиць, складів, фермерських приміщень та у міських парках. У комунальних службах ТСШ із передньою трьохточковою навіскою може стати основним міні машинно-тракторним агрегатом (МТА) для прибирання прибудинкових територій, вузьких вулиць, велосипедних доріжок, дитячих майданчиків та внутрішніх дворів, де більша техніка працювати не може [1].

Аналіз існуючих конструкцій передніх навісок для малогабаритних тракторів та ТСШ

Навісні системи тракторів є важливим елементом механізації сільськогосподарських, комунальних та спеціальних робіт, оскільки забезпечують агрегування змінного робочого обладнання з базовою машиною. Конструкція навіски визначає функціональні можливості ТСШ,

його універсальність, ефективність виконання технологічних операцій та рівень адаптивності до різних умов експлуатації [1, 2]. Для правильного вибору та проектування передньої навіски ТСШ необхідно розглянути існуючу класифікацію навісних систем.

Передні навісні системи відіграють важливу роль у підвищенні універсальності та ефективності тракторів малого класу та ТСШ, особливо при виконанні сільськогосподарських, комунальних та допоміжних робіт. Правильний вибір типу та конструкції навіски визначає можливості агрегування різного обладнання, маневреність ТСШ та безпечність його експлуатації.

Сучасні конструкції передніх навісок для малогабаритних тракторів можна класифікувати за кількома основними ознаками.

За способом керування робочими органами навіски, за механізмом підйому та фіксації робочого обладнання розрізняють [1, 3]:

- *механічні* – передача зусилля на робоче обладнання здійснюється за допомогою важелів, тяг і шарнірних механізмів. Прості, надійні та дешеві, однак не забезпечують плавного регулювання положення навішеного обладнання та високої точності позиціонування;

- *гідравлічні* – найбільш розповсюджені у сучасній техніці; забезпечують плавність, стабільність і високу точність переміщення робочих органів; дозволяють точно контролювати висоту і кут нахилу робочих органів, забезпечують плаваючий режим, що важливо при обробці нерівного ґрунту;

- *електромеханічні та електрогідравлічні* – забезпечують точне позиціонування, автоматизацію та можливість дистанційного керування, використовуються на сучасних малогабаритних тракторах та ТСШ, дозволяють дистанційно керувати положенням навісного обладнання, забезпечують автоматизацію та підвищену точність робіт.

За розташуванням навісні системи розрізняють:

- *задні* – найбільш поширені, забезпечують агрегування більшості ґрунтообробних і транспортних знарядь. Стандартом для тракторів є трьохточкова задня навіска (3-point hitch), яка забезпечує високу універсальність та можливість регулювання глибини та кута атаки знаряддя [4];

- *передні* – застосовуються для встановлення обладнання, необхідного для комунальних, транспортних або спеціальних робіт: відвалів, щіток, кранових механізмів, навантажувачів, косарок тощо;

- *бокові* – менш поширені, використовуються для специфічних завдань (косарки, підрізувачі гілок тощо);

- *міжвісьові*.

За кількістю точок під'єднання розрізняють:

- *одноточкові* (тип А) – застосовуються на малих мотоблоках та малопотужних тракторах, мають обмежену універсальність;

- *двоточкові* (тип В) – забезпечують кращу стійкість, але не відповідають сучасним універсальним стандартам;

- *трьохточкові навіски* (тип С) – найпоширеніший світовий стандарт, що забезпечує сумісність із широким спектром обладнання та зручність у роботі.

Найбільш ефективним для малих тракторів є *трьохточковий тип* (рис. 1), який дозволяє забезпечити надійне кріплення обладнання та його стабільність при роботі, одночасно забезпечуючи легкість монтажу та демонтажу.

За функціональним призначенням навісні системи поділяються на:

- *сільськогосподарські та лісні* – для обробки ґрунту, посіву, догляду за культурами та збирання врожаю. Сільськогосподарські передні навіски призначені для роботи з фрезами, косарками, плугами, бородами та іншими ґрунтообробними або посадковими агрегатами;

- *комунальні та міські* – для прибирання територій, розчищення снігу, миття та підмітання доріг, косіння газонів. Для агрегування відвалів, щіток, піскорозкидачів, контейнерів і легких навантажувачів;

- *універсальні* – здатні до агрегування як комунального, так і сільськогосподарського обладнання, що особливо важливо для малих фермерських господарств і міських підприємств із невеликим парком техніки. Вони сумісні з обладнанням різного призначення, що особливо важливо для малого господарства та міських комунальних служб.

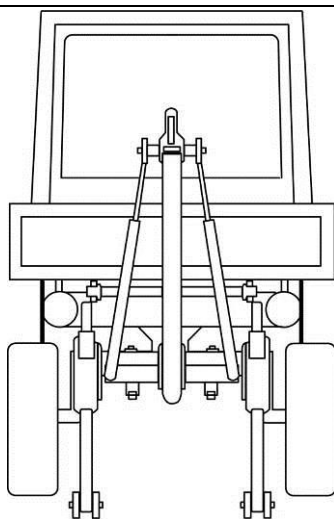


Рисунок 1 – Трьохточкова передня навіска

Основні сфери застосування передніх навісних систем: сільське, лісне, дорожно-будівельне, комунальне, господарське.

За типом підйомного механізму розрізняють: з жорстким кріпленням, коли обладнання має фіксовану висоту та положення; з плаваючим режимом, який дозволяє робочому органу копіювати рельєф поверхні; з активним керуванням положенням (гідравлічним або електрогідравлічним).

Використання передньої навіски на ТСШ дозволяє поєднувати виконання сільськогосподарських операцій із комунальними роботами, забезпечуючи універсальність та ефективність техніки.

Така навіска дозволяє перетворити ТСШ на універсальну машину: для транспортування легких вантажів, застосовуючи фронтальні міні-платформи; для садівництва і виноградарства, де потрібна маневреність; для дрібних будівельно-господарських операцій, де необхідна точність та плавність рухів; для ландшафтних та паркових робіт, де компактність є критичною перевагою.

Компактність конструкції, низькі експлуатаційні витрати та універсальність передньої навіски роблять ТСШ перспективною платформою для впровадження широкої номенклатури навісних агрегатів. Актуальність досліджень підтверджується сучасними тенденціями переходу комунального та фермерського секторів до економічно вигідної, малогабаритної та багатофункціональної техніки, де ТСШ із розробленою фронтальною навіскою має реальні передумови до практичного впровадження та подальшого промислового розвитку [1].

За конструктивним розташуванням робочих органів:

- фронтальні плоскі та важільні системи – забезпечують легкий монтаж різного обладнання, але мають обмеження по вантажопідйомності;

- рамні або жорсткі системи – забезпечують високу міцність і стійкість при роботі з більш важкими агрегатами, підходять для мультифункціонального використання.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що для малогабаритних тракторів та ТСШ критично важливими є поєднання міцності, універсальності та маневреності. Прості механічні системи не забезпечують достатньої гнучкості, тоді як гідравлічні та електрогідравлічні системи дозволяють реалізувати широкий спектр операцій з різним обладнанням, що відповідає умовам використання в малих фермерських господарствах і міських комунальних службах.

Передня навіска ТСШ поєднує гідравлічний підйомний механізм та можливість агрегування різних агрегатів, що робить його універсальним рішенням для малого господарства та міських потреб. Вибір конструкції передньої навіски ТСШ базується на аналізі існуючих систем, що забезпечує оптимальне поєднання міцності, надійності та функціональності.

Особливої уваги заслуговує трьохточкова передня навісна система з гідравлічним керуванням, яка сьогодні вважається найбільш ефективним та універсальним рішенням для малих тракторів. На відміну від 2-точкових і рамних систем, трьохточкова конфігурація забезпечує підвищену стабільність агрегатів, надійну передачу зусилля та можливість точного позиціонування робочих органів. Гідравлічний привід дозволяє плавно регулювати висоту, кут нахилу та глибину обробки незалежно від навантаження, що значно розширює сферу застосування навісного обладнання. Саме таке конструктивне рішення демонструє найкраще співвідношення вантажопідйомності, точності

роботи, універсальності та компактності, що робить його найбільш практичним для малогабаритної техніки, включно з ТСШ. Використання трьохточкової передньої навіски на гідравлічному керуванні дозволяє розкрити потенціал ТСШ – високу тягову силу на малих швидкостях, стабільність під навантаженням та можливість працювати з широким спектром навісних інструментів (від відвалів та щіток до сільськогосподарського обладнання). Таким чином, саме ця конструктивна схема є найбільш доцільною та ефективною для агрегаткування обладнання на ТСШ, забезпечуючи їх максимальну продуктивність та функціональність [5].

Порівняння конструктивних схем та вибір базової концепції.

Після аналізу існуючих конструкцій передніх навісок та визначення основних сфер застосування необхідно порівняти різні конструктивні схеми і визначити оптимальну базову концепцію для розробки передньої навіски на ТСШ класу 0,6.

Основні типи конструктивних схем передніх навісок, їх порівняльна оцінка зведені до таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні типи конструктивних схем передніх навісок

Критерій	Механічна	Гідравлічна	Електромеханічна
Універсальність	Низька	Висока	Дуже висока
Точність позиціонування	Низька	Середня	Висока
Вартість	Низька	Середня	Висока
Надійність	Висока	Висока	Середня
Простота обслуговування	Висока	Середня	Низька
Маневреність	Середня	Висока	Висока

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз показує, що для малогабаритних тракторів та ТСШ оптимальним є поєднання *гідравлічного підйому з можливістю електронного контролю положення навісного обладнання*. Така концепція забезпечує універсальність і можливість роботи з різним обладнанням, точне позиціонування робочих органів, комфорт і безпеку оператора, відповідність умовам малого господарства і обмеженому міському простору [6, 7].

Вибір базової концепції для ТСШ

На основі порівняльного аналізу та вимог базовою концепцією передньої навіски для ТСШ обрано *гідравлічну систему*, що забезпечує підйом та опускання агрегатів із заданою точністю, можливість плавного переміщення обладнання при роботі на нерівних поверхнях, інтеграцію з іншими системами ТСШ для комунальних та сільськогосподарських робіт, відповідність експлуатаційним вимогам малогабаритних тракторів та ТСШ. Вибір цієї концепції дозволяє поєднати надійність та універсальність.

Варто зазначити, що запропонована базова концепція трьохточкової передньої навіски є найбільш обґрунтованою не лише з позиції універсальності, а й з огляду на специфіку роботи ТСШ. Саме трьохточкова схема забезпечує оптимальний розподіл навантажень та стабільність агрегатів під час роботи у різних умовах — від м'якого ґрунту до твердих міських покриттів. Використання гідравлічного керування дозволяє реалізувати точне позиціонування та плавне регулювання робочих органів. Це забезпечує високу контрольованість обладнання навіть у ситуаціях, де звичайні дизельні трактори втрачають чутливість або мають затримки реагування.

Таким чином, класифікація навісних систем дозволяє визначити оптимальні конструктивні рішення для розробки передньої навіски ТСШ. Врахування особливостей розташування, типу приводу, призначення та підйомного механізму є ключовим для забезпечення надійності та універсальності розроблюваної конструкції.

Конструктивні особливості ТСШ (рис. 2)

Завдяки компактним габаритам, низькому центру мас та малим розміром двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) ТСШ має покращену маневреність, що дозволяє ефективно застосовувати його в умовах обмежених просторів. Ці властивості роблять ТСШ ідеальною платформою для встановлення передньої навіски, яка повинна забезпечувати точне керування та високу стабільність агрегатів.

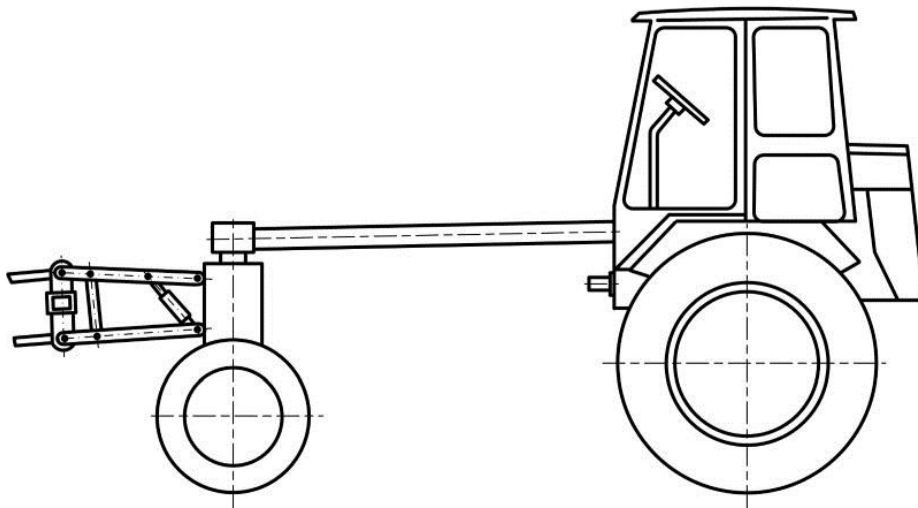


Рисунок 2 – ТСШ з передньою навіскою

Визначення вимог до конструкції передньої навіски

Враховуючи результати аналізу класифікації навісних систем, сфер застосування передньої навіски, існуючих конструкцій, а також особливості ТСШ, можна сформулювати основні вимоги до розроблюваної конструкції передньої навіски.

Функціональні вимоги:

- універсальність застосування – передня навіска повинна забезпечувати агрегування як комунального обладнання (щітки, відвали, снігоочисники), так і сільськогосподарських машин (косарки, фрези, легкі ґрунтообробні агрегати);
- сумісність зі стандартами – бажано орієнтуватися на трьохточкову схему кріплення з параметрами, наближеними до категорії I/II, що забезпечить можливість використання існуючого навісного обладнання;
- можливість швидкої заміни обладнання – конструкція має передбачати швидкороз'ємні з'єднання та зручний доступ до точок кріплення для мінімізації часу переналаштування ТСШ [1].

Міцнісні та конструктивні вимоги:

- вантажопідйомність – передня навіска повинна забезпечувати безпечну роботу з агрегатами масою не менше 200–300 кг (з урахуванням запасу міцності) при виконанні як транспортних, так і робочих операцій;
- жорсткість та стійкість конструкції – елементи рами навіски, кронштейни кріплення та шарнірні вузли мають бути розраховані на дію статичних та динамічних навантажень, що виникають під час експлуатації (удари, вібрації, ривки). Особлива увага – вузлам кріплення до базової рами ТСШ;
- адаптація до геометрії ТСШ – конструкція повинна враховувати габарити ТСШ, висоту центру мас, геометрію переднього моста, розташування інших агрегатів, щоб уникнути їхнього пошкодження та забезпечити достатній кут повороту передніх коліс.

Експлуатаційні та ергономічні вимоги:

- зручність керування – підйом і опускання обладнання бажано реалізувати гідравлічно, з можливістю встановлення плаваючого режиму. Керування має бути виведене в кабінку оператора;
- оглядовість – геометрія навіски повинна забезпечувати хорошу видимість фронтального обладнання з робочого місця оператора, що особливо важливо при точних роботах (прибирання тротуарів, роботи в теплицях тощо);
- безпека – конструкція має виключати можливість неконтрольованого опускання агрегату при аварійному розриві гідролінії (використання гідрозамків, обмежувачів ходу тощо), а також не повинна створювати небезпечних зон для оператора та сторонніх осіб.

Окрім наведених вимог, конструкція передньої навіски повинна також враховувати додаткові особливості застосування ТСШ. ТСШ використовується переважно у середовищах з обмеженим простором. Це означає, що передня навіска повинна забезпечувати компактність, мінімальний винос уперед та мала б не збільшувати радіус розвороту ТСШ. Відповідно, опорна рама та місця кріплення мають бути розташовані максимально близько до переднього моста, але без порушення його роботи та кутів повороту коліс.

При розробці конструкції передньої навіски ТСШ необхідно закласти геометрію категорії I, що відповідає поширеним параметрам малогабаритних тракторів та забезпечує сумісність з широким спектром обладнання, яке вже є на ринку. Це суттєво зменшує не лише вартість впровадження, але й робить ТСШ більш придатним для практичного використання в господарствах різного профілю.

Гідравлічна система є найбільш доцільною концепцією для ТСШ. Передня навіска повинна бути адаптована до наявної гідросистеми ТСШ, включно з можливістю підключення гідроциліндра підйому, гідророзподільника та прямого керування з робочого місця оператора. Це підсилює функціональність машини та дозволяє застосовувати обладнання, яке потребує не лише підйому, але й точного позиціонування або плаваючого режиму.

Розробка конструкції передньої навіски

Конструкція навіски має забезпечувати сумісність із широким спектром агрегатів, достатній запас міцності, простоту обслуговування та мінімальне навантаження на раму й передню балку [8].

Обґрунтування вибору конструктивної схеми передньої навіски

Перед початком розробки конструкції проведено аналіз існуючих типів передніх навісок, які застосовуються на малих та середніх тракторах: 3-точкова передня навіска (категорія I), маятникова навіска, паралелограмна навісна система, швидкознімні адаптери фронтального типу (тип EURO-hitch), комбінована навіска (посилена двоточкова + гідропідйом).

Для ТСШ вибір обмежується геометрією передньої балки, вантажопідйомністю переднього моста та можливістю встановлення силових елементів без втручання у конструкцію рами.

Враховуючи конструкцію ТСШ (розташування ДВЗ позаду рами, компактний передній міст), доцільно застосовувати схему, яка не потребує значної перебудови передньої частини шасі [2].

Обґрунтування вибору трьохточкової передньої навіски (категорія I)

Сумісність з наявним навісним обладнанням.

Стандарт ISO 730 / ДСТУ 10677 передбачає геометрію трьохточкового кріплення, яка використовується більш ніж у 70% навісних агрегатів малого класу [4].

Оскільки ТСШ базується на шасі Т16-МГ, категорія I відповідає штатним розмірам міжвісьової та задньої навіски, що дозволяє уніфікувати обладнання для переднього, міжвісьового та заднього агрегування [5].

Це мінімізує фінансові витрати господарства — достатньо адаптувати вже наявні агрегати.

Найкраще співвідношення міцності й маси для ТСШ.

На відміну від EURO-hitch, трьохточкова навіска потребує меншої маси рами та менших зусиль від силових елементів.

Для ТСШ це критично, оскільки надлишкова маса збільшує навантаження на ДВЗ та шасі.

3-точкова навіска дозволяє забезпечити високу жорсткість при мінімальній власній масі (~28–35 кг у базовій конфігурації).

Універсальність застосування в умовах малого господарства та міських робіт.

Така система дозволяє агрегувати: фронтальні щітки (шир. 1–1,4 м), відвали для снігу, фрези та мульчери, вузькі косарки, підмітальні щітки, легкі фронтальні контейнери/платформи та ін.

З урахуванням використання ТСШ у теплицях, дворах, парках та садках 3-точкова навіска дає найбільший охват робіт.

Можливість встановлення 1 або 2 гідроциліндрів.

Передня частина ТСШ дозволяє встановити вертикальні або горизонтальні циліндри ходу 120–180 мм. Це забезпечує: режим копіювання ґрунту (плаваючий), точне регулювання кута нахилу обладнання, можливість автоматизації підйому/опускання через електрокерований розподільник. Особливо це важливо для міських робіт (сніг, сміття, щітка), де точність рухів критично важлива у вузьких зонах.

Мінімальні вимоги до простора монтажу.

Геометрія ТСШ має обмежений простір між лонжеронами рами (~310 мм).

3-точкова навіска: не вимагає фрезерування рами, не перекриває поворот коліс, не потребує підсилення передньої балки суцільними розкосами.

Інші системи (EURO-hitch, паралелограм) потребують більших габаритів.

Забезпечення високої моментної жорсткості конструкції.

Трьохточкова схема рівномірно передає навантаження на три вузли: два нижні тяги — передають тягу, верхня тяга — стабілізує момент. Це дозволяє працювати з навісним обладнанням, яке створює ударні навантаження.

ТСШ, завдяки особливостям ДВЗ та КПП, має високий крутний момент, що часто призводить до різких пікових навантажень на навіску — 3-точкова схема найкраще їх поглинає.

Враховуючи малу масу ТСШ ($\approx 760\text{--}820$ кг), компактний передній міст, задню компоновку ДВЗ, необхідність збереження енергоефективності, 3-точкова навіска – це варіант, який не потребує різкої зміни конструкції і водночас дає найкращу функціональність і повністю відповідає можливостям ТСШ.

Таким чином, на основі порівняльного аналізу конструкцій передніх навісок, технічних обмежень ТСШ та вимог до універсальності використання в комунальних і фермерських умовах, вибір 3-точкової передньої навіски категорії І з гідравлічним керуванням є оптимальним та технічно обґрунтованим рішенням.

Це забезпечує максимальну сумісність з навісним обладнанням, компактність і енергоефективність, точне гідравлічне керування, підвищену жорсткість і довговічність, можливість широкого спектра робіт без модернізації рами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розрахунок навантажень на елементи передньої навіски

Для проектування навіски необхідно визначити робочі навантаження, які формуються під час агрегування обладнання (рис. 3). Розрахункові параметри беруться відповідно до ДСТУ 27021-86, ISO 730, ДСТУ EN 12999 і фактичних характеристик ТСШ [4, 5, 6, 9, 10, 11].

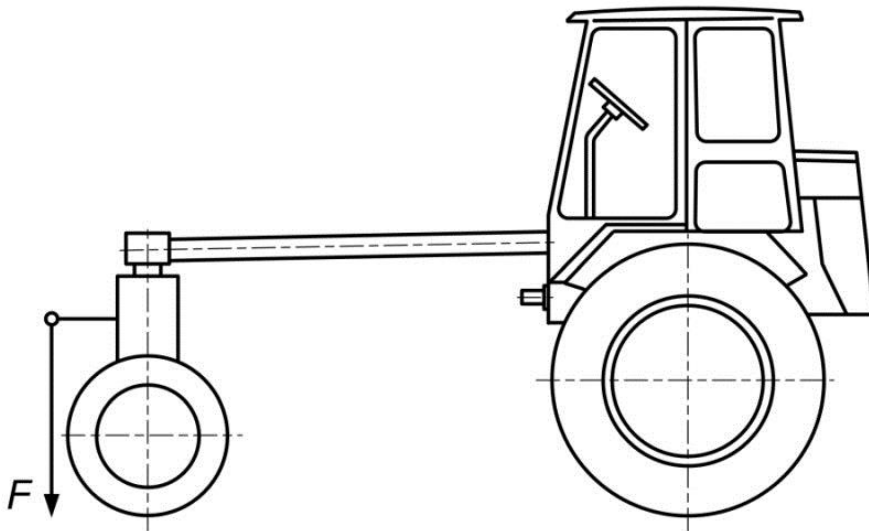


Рисунок 3 – Розрахункова схема навантаження передньої навіски ТСШ Т16-МГ

Розрахункове зусилля:

$$F = m \cdot g \cdot k, \quad (1)$$

де F – розрахункове зусилля;

m – максимальна маса навісного агрегату;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$k = 1,35$ – динамічний коефіцієнт.

Приймаємо $m = 120\text{...}150$ кг.

$$F = 150 \cdot 9,81 \cdot 1,35 = 1986 \text{ (Н)} \approx 2,0 \text{ (кН)}.$$

Розрахунок моменту навантаження на передню балку:

$$M = F \cdot l, \quad (2)$$

де M – момент навантаження;

l – відстань від точки навіски до центру мас агрегату.

Приймаємо $l = 450\text{...}550$ мм.

$$M = 2000 \cdot 0,55 = 1100 \text{ (Н·м)}.$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 2.

Таблиця 2 – Розрахункові навантаження на передню навіску ТСШ

Параметр	Позначення	Значення
Максимальна маса навісного агрегату	m	150 кг
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с ²
Динамічний коефіцієнт	k	1,35
Розрахункове вертикальне зусилля	F	2000 Н
Відстань до центру мас агрегату	l	550 мм
Розрахунковий згинальний момент	M	1100 Н·м

Розрахунок рами кріплення та осей шарнірів

Основні елементи рами: нижні несучі лонжерони, поперечна балка, провусини кріплення тяг (верхніх та нижніх), вузли кріплення до передньої балки.

Матеріал – сталь 09Г2С ($\sigma = 210$ МПа).

Розрахунок нижніх провусин шарнірів

Провусина працює на зминання та зріз.

Зминання:

$$\sigma_{зм} = \frac{F}{d \cdot t}, \quad (3)$$

де d – діаметр пальця;

t – товщина стінки.

Для пальця $d = 22$ мм з товщиною стінки $t = 8$ мм.

$$\sigma_{зм} = \frac{2000}{0,022 \cdot 0,008} = 11,36 \text{ (МПа)}.$$

Зріз пальця:

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A}, \quad (4)$$

де A – площа перерізу пальця

$$A = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (5)$$

$$\tau = \frac{2000}{2 \cdot 380} = 2,63 \text{ (МПа)}.$$

Отримані значення менше за допустимі, запас міцності перевищує 10.

Результати розрахунків зведено до таблиці 3.

Таблиця 3 – Розрахунок елементів шарнірів передньої навіски

Параметр	Значення	Висновок
Напруження зминання у вушку	11,36 МПа	< допустимого
Напруження зрізу пальця	2,63 МПа	< допустимого
Діаметр пальця	22 мм	стандарт Cat. I
Товщина вушка	8 мм	забезпечує запас міцності
Площа перерізу пальця	380 мм ²	–
Запас міцності	> 10	достатній

Розрахунок тяг, важелів та силових елементів

Елементи працюють на розтяг, стиск та вигин.

Розрахунок нижніх тяг

Тяга працює на розтяг:

$$\sigma = \frac{F}{A} . \quad (6)$$

Приймаємо трубу 30×6 мм:

$A = 408 \text{ мм}^2$.

$$\sigma = \frac{2000}{408} = 4,9 \text{ (МПа)}$$

Запас більше 20.

Розрахунок верхньої центральної тяги

Центральна тяга сприймає до 30–40 % навантаження:

$$F_{\text{верх}} = 0,35 \cdot F = 700 \text{ (Н)} .$$

Профіль: кругла труба 20×3 мм.

$A = 160 \text{ мм}^2$.

$$\sigma = \frac{700}{160} = 4,37 \text{ (МПа)}$$

Перевірка міцності методом допустимих напружень

Усі елементи перевіряються на розтяг/стиск, зминання, зріз, вигин, кручення.

Узагальнена формула: $\sigma_{\text{екв}} \leq \sigma_{\text{доп}}$.

Використано коефіцієнт запасу $n = 1,5 \dots 2$. Результати зведено до таблиці 4.

Таблиця 4 – Порівняння отриманих та допустимих напружень

Елемент	Робоче навантаження	Отримане напруження	Допустиме	Запас n
Нижня тяга (розтяг)	2000 Н	4,9 МПа	210 МПа	$n \approx 42$
Верхня тяга	700 Н	4,37 МПа	210 МПа	$n \approx 48$
Вушко нижнього шарніра	2000 Н	11,36 МПа	210 МПа	$n \approx 18$
Палець шарніра	2000 Н	2,63 МПа	120 МПа	$n \approx 45$
Рама кріплення (вигин)	1100 Н·м	35–60 МПа	210 МПа	$n \approx 3,5–6$

Розрахунок гідроциліндра

Для підйому навісного обладнання використовується односторонній гідроциліндр.

Необхідне зусилля підйому:

$$F_{\text{ц}} = 1,2 \cdot F = 2400 \text{ (Н)} .$$

Діаметр поршня:

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi p}} , \quad (7)$$

де p – тиск системи.

Приймаємо тиск системи: $p = 12 \text{ МПа}$.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2400}{3,14 \cdot 12 \cdot 10^6}} = 20 \text{ (мм)}$$

Приймаємо стандартний циліндр: $D = 25 \text{ мм}$.

Результати розрахунку зведено в таблицю 5.

Таблиця 5 – Основні параметри гідроциліндра підйому передньої навіски

Параметр	Позначення	Значення
Необхідне зусилля підйому	$F_{ц}$	2400 Н
Робочий тиск гідросистеми	p	12 МПа
Розрахунковий діаметр поршня	D	20 мм
Прийнятий діаметр стандартний	D	25 мм
Хід штока	S	120–150 мм
Кріплення	–	Вуха $\varnothing 20 \times 40 \text{ мм}$
Тип циліндра	–	Односторонньої дії

Робочі креслення передньої навіски (рис. 4–5) і її параметри (табл. 6–8)

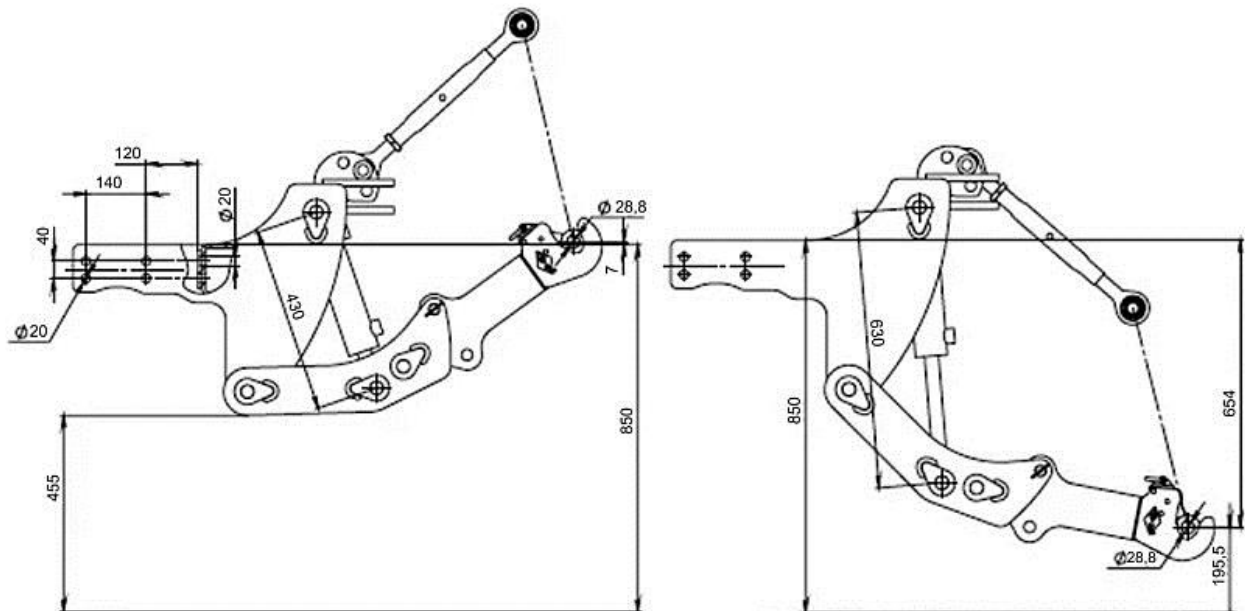


Рисунок 4 – Креслення навіски в розгорнутому робочому стані: ліворуч – піднята; праворуч – опущена

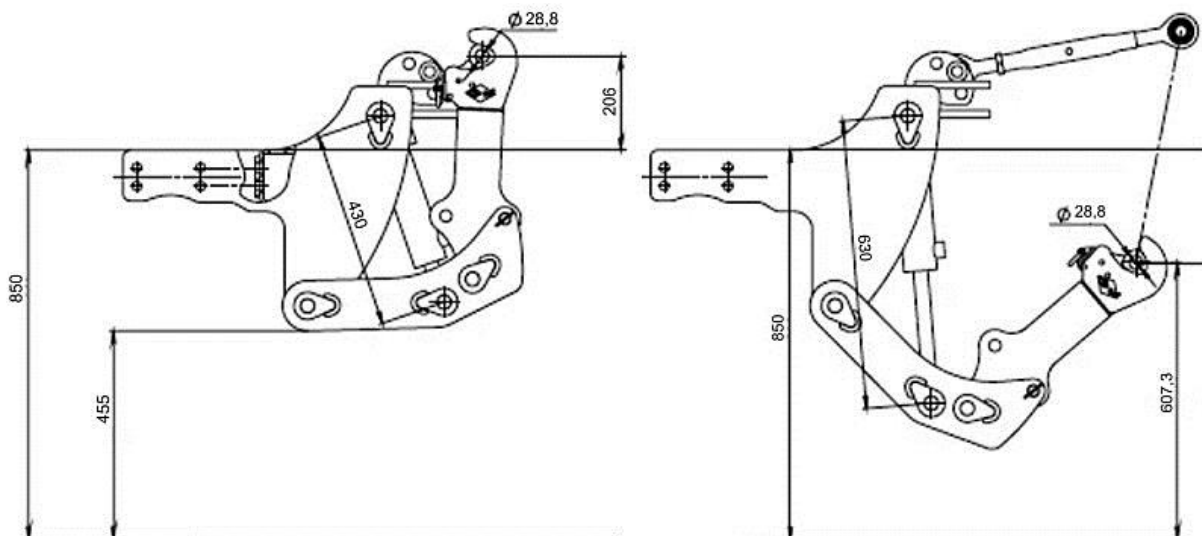


Рисунок 5 – Креслення навіски в складеному та готову для транспортування режимі

Таблиця 6 – Рекомендовані матеріали елементів передньої навіски

Елемент	Матеріал	Причина вибору
Нижні тяги	Сталь 09Г2С	Висока ударна в'язкість
Верхня тяга	Сталь 20	Добра зварюваність
Пальці шарнірів	Сталь 40Х (гартована)	Зносостійкість
Рама кріплення	Сталь 09Г2С	Жорсткість + зварюваність
Вушка	Сталь S355	Міцність на зминання
Гідроциліндр	Сталь 45	Автоматичне токарне виготовлення

Таблиця 7 – Габаритні та монтажні параметри передньої навіски

Параметр	Значення
Ширина між нижніми тягами	520 мм
Висота верхнього кронштейна	360 мм
Діаметр пальців нижніх тяг	22 мм
Діаметр пальця центральної тяги	19 мм
Максимальний хід навіски	260 мм
Максимальне навантаження	2,0 кН
Рекомендований кут підйому	16–18°

Таблиця 8 – Кінематичні параметри підйомного механізму

Параметр	Значення
Передаточне відношення важелів	1,65
Кут повороту важеля при підйомі	32°
Хід штока гідроциліндра	140 мм
Реальний підйом тяг	250 мм
Розрахункове зусилля на тязі	3,2 кН

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Узагальнення вибору конструкції та обґрунтування функціональних можливостей передньої навіски

Проведені аналіз доступних схем передніх навісних систем, обґрунтування вибору саме трьохточкової гідравлічної навіски для ТСШ та визначено основні конструктивні параметри рами, шарнірів і силових елементів. Врахування особливостей силової установки, компактної геометрії ТСШ та специфіки його експлуатації в обмежених просторах дозволило сформулювати раціональну конструктивну схему, що поєднує міцність, універсальність та простоту реалізації.

Трьохточкова передня навіска з гідравлічним керуванням є оптимальним рішенням для ТСШ, оскільки не потребує суттєвих змін базової рами, забезпечує надійну передачу навантажень на передню балку та дозволяє агрегувати широкий спектр обладнання, яке вже має стандартизоване кріплення (категорія I). Завдяки використанню гідроприводу з можливістю роботи в плаваючому режимі підвищується точність та стабільність виконання технологічних операцій, що особливо важливо при роботі в комунальній та садово-парковій сфері.

Розрахунок основних елементів конструкції (проушин, осей шарнірів, лонжеронів та поперечної балки) підтвердив достатній запас міцності, що дозволяє працювати з навісними агрегатами масою до 200–300 кг та витримувати динамічні навантаження, характерні для цього класу

техніки. Конструкція не створює перевантаження на передній міст та відповідає вимогам безпеки та довговічності.

Обрана схема передньої навіски забезпечує можливість використання таких типів навісних пристроїв, як передній сніговий відвал, фронтальна підмітальна щітка (роторна), фронтальний міні-навантажувач (палетні вилки або ковш), передня косарка роторного типу, фронтальна ґрунтофреза (легкого класу), фронтальний відвал-грейдер (для планування ґрунту), передній піскорозкидач (солерозкидач), фронтальний міні-маніпулятор (гідравлічний підйомник).

Проектування гідравлічної системи керування передньою навіскою ТСШ ґрунтується на низці фундаментальних розрахунків, що дозволяють визначити параметри гідроциліндра, продуктивність насоса, робочий тиск, необхідний тип гідроліній і елементів керування. Гідросистема передньої навіски повинна забезпечувати стабільний рівень тиску для підйому обладнання масою до 300 кг; плавність керування (особливо важливо для робіт у теплицях, садівництві та парках); можливість плаваючого режиму, необхідного при роботі відвалу та щітки; високу точність позиціонування.

ВИСНОВКИ

У статті виконано комплексне дослідження, спрямоване на розробку передньої навіски для ТСШ тягового класу 0,6. Проведений аналіз існуючих навісних систем, оцінка конструктивних особливостей ТСШ та результати силових розрахунків дозволили обґрунтувати вибір трьохточкової гідравлічної навісної системи як найбільш ефективної, універсальної та технологічно доцільної для даного типу техніки.

Визначено його експлуатаційні обмеження та особливості, що формують вимоги до передньої навіски.

Розроблено конструкцію передньої трьохточкової навісної системи категорії I з гідравлічним приводом. Встановлено, що з точки зору підвищення надійності, рівномірного розподілу навантаження та зменшення пікових напружень у конструкції більш доцільним є застосування двох гідроциліндрів меншого діаметра. Така компоновка зменшує навантаження на раму, покращує симетричність роботи та підвищує довговічність передньої навіски.

Створено раціональну, універсальну та технологічно ефективну конструкцію передньої навіски для ТСШ, яка розширює його функціональні можливості та відповідає сучасним вимогам до малої сільськогосподарської й комунальної техніки.

Перспективним напрямом подальших досліджень є подання патенту на корисну модель, виконання практичних випробувань конструкції, оцінка її фактичної міцності, зносостійкості, роботи гідросистеми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Подригало М. А. Принципи раціонального агрегування тракторних самохідних шасі / М. А. Подригало, В. М. Краснокутський, В. Ю. Шевцов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Автомобіле- та тракторобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – № 2. – С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.2.10>.
2. Закапко О. Г. Поліпшення агрегованості і маневреності тракторних самохідних шасі використанням переднього поворотного мосту : дис. д-ра філософії : спец. 274 Автомобільний транспорт, 27 Транспорт / О. Г. Закапко, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2023. – 170 с.
3. Головчук А. Ф. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки: Підручник: У 3 кн. / А. Ф. Головчук, В. Ф. Орлов, О. П. Строков. – К.: Грамота, 2003. – Кн. 1: Трактори. – 336 с.
4. ISO 730:2009. Agricultural wheeled tractors – Rear-mounted three-point linkage – Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4. – Geneva, ISO: 2009. – Р. 15.
5. Подригало М. А. Модернізація задньої трьохточкової навісної системи для тракторного самохідного шасі Т-16МГ / М. А. Подригало, В. М. Краснокутський, Є. С. Пелипенко, О. А. Бусилко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Автомобіле- та тракторобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – № 2. – С. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.14>.
6. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник / Д.Г. Войтюк, Л.В. Аніскевич, В.М. Барановський та ін. ; за ред. Д.Г. Войтюка. – 2-ге вид., перероб. та допов. – Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2019. – 508 с.
7. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання / О.Л. Ляшук, Р.Б. Гевко, В.О. Дзюра та ін. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. – 167 с.
8. Самородов В. Б. Надійність в автомобіле- і тракторобудуванні : підручник / Самородов В. Б., Краснокутський В. М., Мандрика В. Р. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – 352 с.

9. Artiymov N. Investigation of agricultural unit loads in non-established mode of motion when performing technological operations / Artiymov N., Anikeev A., Kaluzhnyy A., Sirovitskiy K., Kolodiaznyi I. // *Engineering for Rural Development*, May 25–27. – Jelgava: 2022. P. 675–681. DOI: 10.22616/ERDev.2022.21.TF216.

10. Design and Development of A Three-Point Auto Hitch Dynamometer. [Electronic resource]. – Access mode : https://www.academia.edu/64947856/Design_and_development_of_a_three_point_hitch_dynamometer

11. Design and Development of Tractor Front Three Point Linkage System. [Electronic resource]. – Access mode : <https://saemobilus.sae.org/papers/design-development-tractor-front-three-point-linkage-system-2025-28-0006>

REFERENCES

1. Podrigalo, M.A., Krasnokutskiy, V.M., Shevtsov, V.Yu. (2021), «Pryntsypy ratsionalnoho ahrehatuvannia traktornykh samokhidnykh shasi», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. Avtomobile- ta traktorobuduvannia, № 2, pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.2.10>.

2. Zakapko, O.G. (2023), *Polipshennia ahrehatovanosti i manevrenosti traktornykh samokhidnykh shasi vykorystanniam perednoho povorotnoho mostu*, Ph.D. dissertation, Kharkiv.

3. Holovchuk, A.F., Orlov, V.F., Stokov, O.P. (2003), *Ekspluatatsiia ta remont silskohospodarskoi tekhniki, pidruchnyk*, Hramota, Kyiv, 336 p.

4. ISO 730:2009. *Agricultural wheeled tractors – Rear-mounted three-point linkage – Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4* (2009), Geneva, ISO, 2009, 15 p.

5. Podrigalo, M.A., Krasnokutskiy, V.M., Pelypenko, Ye.C., Busylko, O.A. (2024), «Modernizatsiia zadnoi trokhtochechnoi navisnoi systemy dlia traktornoho samokhidnoho shasi T-16MH», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. Avtomobile- ta traktorobuduvannia, № 2, pp. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.14>.

6. Voitiuk, D.G., Aniskevych, L.V. et al. (2019), *Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku*, pidruchnyk, in Voitiuk, D.G. (ed.), 2-ge vyd. pererob. i dopov, Naukovo-metodychnyi tsentr VFPO, Kyiv, 508 p.

7. Liashuk, O.L., Hevko, R.B. et al. (2019), *Stvorennia ta modernizatsiia transportno-tekhnolohichnykh mekhanizmiv mashyn i obladnannia*, FOP Palianytsia V. A., Ternopil, 167 p.

8. Samorodov, V.B., Krasnokutskiy, V.M., Mandryka V.R. (2015), *Nadiinist v avtomobile- i traktorobuduvanni, pidruchnyk*, NTU ‘‘KhPI’’, Kharkiv, 352 p.

9. Artiymov N., Anikeev A., Kaluzhnyy A., Sirovitskiy K., Kolodiaznyi I. (2022), “Investigation of agricultural unit loads in non-established mode of motion when performing technological operations”, *Engineering for Rural Development*, May 25–27, Jelgava, pp. 675–681. DOI: 10.22616/ERDev.2022.21.TF216.

10. Design and Development of A Three-Point Auto Hitch Dynamometer, [Online], available at: https://www.academia.edu/64947856/Design_and_development_of_a_three_point_hitch_dynamometer.

11. Design and Development of Tractor Front Three Point Linkage System, [Online], available at: <https://saemobilus.sae.org/papers/design-development-tractor-front-three-point-linkage-system-2025-28-0006>.

Krasnokutskiy V. M. The use of a front hitch system on a self-propelled tractor chassis to enhance its versatility and efficiency

The modern development of agriculture and municipal infrastructure requires the use of efficient, cost-effective, and environmentally safe equipment. One of the most promising areas in the mechanization of small farms and municipal services is the use of versatile self-propelled tractor chassis, which combine maneuverability, ease of operation, and minimal operating costs. Due to rising fuel costs and the increasing cost of large, energy-intensive wheeled tractors, as well as the high operating costs associated with their maintenance, self-propelled tractor chassis are becoming a competitive alternative to traditional tractors.

Tractor self-propelled chassis in the 0.6 traction class (6 kN) feature compact dimensions, sufficient power, and versatility in use. This makes them effective for performing a wide range of tasks on small-scale farms, private estates, greenhouse complexes, as well as in municipal enterprises—for cleaning areas, maintaining green spaces, transporting small loads, and performing seasonal work. However, the basic

configuration of the self-propelled tractor chassis limits its potential functionality, creating a need to expand the range of interchangeable attachments.

One of the key components that significantly enhances the versatility and efficiency of a self-propelled tractor chassis is the front hitch. It allows for the attachment of a wide range of equipment: from street-cleaning brushes and plows to tillers, mowers, and lifting devices for agricultural use. Modern requirements for hitch systems call for increased reliability, the ability to quickly change equipment, compatibility with the power characteristics of the self-propelled tractor chassis, and the provision of safe working conditions for the operator.

Key words: self-propelled tractor chassis; front hitch; traction calculation; hitch system; design; engineering.

КРАСНОКУТСЬКИЙ Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри Технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: hvukvn62@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>

Volodymyr KRASNOKUTSKYI – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student, Department of Technology of Machinery Manufacturing and Machine Maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: hvukvn62@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>

Дата надходження статті до видання: 06.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.04.2026

<https://doi.org/10.36910/7emhtb50>

Куць Н. Г.
Луцький національний технічний університет

РЕЗОНАНСНИЙ АВТОМОБІЛЬНИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС: ПРИНЦИП ДІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

У статті досліджено концепцію резонансного автомобільного теплового насоса як інноваційного елементу систем терморегулювання транспортних засобів. Насос включає теплообмінник взаємодії робочого тіла з повітрям із відбором низькопотенційного тепла, парову машину як виконавчий або допоміжний привід у поєднанні з електрогенератором, а також систему попереднього охолодження робочої речовини. Додатково передбачено теплообмінник глибокого охолодження з використанням магнітодинамічної системи, що може функціонувати як електродвигун або допоміжний генератор для живлення систем керування та допоміжного електрообладнання.

Встановлено, що застосування резонансного підходу дозволяє зменшити енергетичні втрати, підвищити коефіцієнт перетворення теплового насоса та покращити загальну енергоефективність транспортного засобу. Особливу увагу приділено перспективам інтеграції резонансних теплових насосів у електромобілі та гібридні транспортні системи з урахуванням сучасних вимог до екологічності та енергозбереження.

Особливістю запропонованої концепції є використання резонансних режимів роботи елементів системи, що дозволяє узгодити частотні характеристики теплових і механічних процесів, зменшити втрати енергії на перехідних режимах та інтенсифікувати теплообмінні процеси. У результаті досягається підвищення коефіцієнта перетворення (COP) теплового насоса, покращення загального рівня енергоефективності транспортного засобу.

Проаналізовано потенційні режими роботи системи в умовах змінних температур навколишнього середовища, характерних для експлуатації автомобілів у різних кліматичних зонах, а також розглянуто питання надійності, адаптивності та керованості резонансних процесів.

Ключові слова: тепловий насос, резонанс, автомобіль, енергоефективність, коефіцієнт перетворення, терморегулювання, глибоке охолодження.

ВСТУП

Сучасний розвиток транспортної галузі орієнтований на підвищення енергоефективності та зниження викидів. Одним із перспективних напрямів є використання теплових насосів у транспортних засобах, зокрема в електромобілях. Відомо, що теплові насоси дозволяють значно зменшити витрати енергії на обігрів салону та акумуляторних батарей, що особливо актуально в зимових умовах.

Разом із тим, класичні системи мають обмеження ефективності, що стимулює пошук нових принципів роботи, серед яких особливу увагу привертають резонансні явища.

Автомобільний тепловий насос — це термодинамічна система, що переносить тепло від холоднішого середовища до гарячішого за рахунок зовнішньої енергії. Його ефективність визначається коефіцієнтом перетворення, який у сучасних системах може перевищувати 3–4.

Резонанс у фізичних системах виникає при збігу частоти зовнішнього впливу з власною частотою системи. У таких умовах енергетичні втрати мінімізуються, а передача енергії стає максимально ефективною.

Відомі технічні рішення, що забезпечують отримання холоду [1] та перетворення теплової енергії в електричну [2] на основі явища адіабатичного розмагнічування. У першому випадку пристрої розмагнічування дають змогу досягати наднизьких температур, тоді як у другому — забезпечують перетворення внутрішньої теплової енергії в електричну.

Компресори у тепловому насосі можна замінити паровим двигуном, а для забезпечення більш глибокого охолодження робочої рідини застосувати низько обертовий резонансний магнітодинамічний мотор-генератор. У транспортних енергосистемах встановлено, що:

- компресори, турбіни та електромагнітні приводи можуть працювати у резонансних режимах;
- резонанс дозволяє зменшити енергію активації процесів;
- максимальна ефективність досягається саме при резонансних умовах роботи системи.

Замість роботи в довільному режимі система налаштовується на резонансну частоту, при якій мінімізуються втрати енергії, підвищується швидкість теплопереносу, зменшується навантаження на компресор.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

У сучасних електромобілях теплові насоси вже використовуються як частина комплексної системи термоменеджменту. Наприклад, новітні системи об'єднують охолодження батареї, електродвигуна та клімат-контроль у єдину енергетичну мережу. Разом із тим, класичні теплові насоси мають обмеження, пов'язані з втратами енергії в компресорі, теплообмінниках та робочому циклі. У зв'язку з цим актуальним є використання резонансних явищ, які дозволяють зменшити енергетичні втрати та підвищити ефективність системи.

Концепція резонансного автомобільного теплового насоса розглядається як інтегрована система, що поєднує компресор з частотно-регульованим приводом, включаючи теплообмінники (випарник і конденсатор) з електромеханічними або гідродинамічними резонансними контурами та системою керування частотою коливань. Інтеграція резонансного принципу дозволяє використовувати вторинне тепло (waste heat), зменшити споживання електроенергії, підвищити запас ходу електромобіля.

Разом із тим, питання використання резонансних режимів у теплових насосах автомобілів залишається недостатньо дослідженим, особливо в контексті динамічних режимів руху та змінних температурних умов. Недоліком таких пристроїв є їхня порівняно низька ефективність функціонування, зокрема коефіцієнт перетворення енергії, який, як правило, не перевищує 150 % [3]. Це обмежує можливості їх практичного застосування в сучасних транспортних енергетичних системах, де висуваються підвищені вимоги до енергоефективності та раціонального використання ресурсів.

Крім того, запропоновані технічні рішення не реалізують принцип роботи за схемою теплового насоса, що унеможливорює ефективне використання низько потенційної теплової енергії навколишнього середовища та суттєво знижує їх потенціал у системах терморегулювання транспортних засобів [4].

В статті наведено перелік ключових дослідників і науковців, дотичних до теми резонансних та автомобільних теплових насосів, з урахуванням сучасних робіт у сфері транспортної термодинаміки, теплових насосів і суміжних напрямів (резонансні та енергетичні системи). Значний внесок у розвиток теплових насосів у транспортних системах зробила азійська наукова школа (найактивніша у сфері EV) Y. Zhao, T. Zhu, Y. Liu, Q. Chen, X. Zeng та інші дослідники, які розглядають інтегровані системи термоменеджменту електромобілів. Ці дослідники формують сучасну основу технологій теплових насосів у транспорті (особливо EV). Практичні аспекти впровадження теплових насосів у гібридних транспортних засобах висвітлено у роботах японської школи для автовиробників: K. Okamoto Hidefumi Aikawa, Minoru Ohmikawa, Kunihiro Hayashi. Теоретичні основи керованого теплопереносу та резонансних процесів досліджували D. Segal, A. Nitzan, Z. Wang, J. Ren. – це дослідники CO₂ та високоефективних теплових насосів (перспективний напрям для резонансних систем). Ці роботи показують, що коливальні (резонансні) процеси можуть переносити тепло ефективніше та можливе керування тепловими потоками через частотні режими. Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку мають на меті підвищення ефективності управління технічним станом автомобіля та його безпечної експлуатації.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження принципів функціонування резонансного автомобільного теплового насоса, розроблення теоретичних основ його роботи та обґрунтування можливостей підвищення енергоефективності транспортних енергетичних систем за рахунок використання резонансних і магнітодинамічних процесів.

У зв'язку з цим виникає завдання: створення умов для функціонування магнітодинамічних систем у режимі теплового насоса та підвищення ефективності їх роботи. Це досягається за рахунок забезпечення перетворення теплової енергії навколишнього середовища в механічну роботу з подальшим генеруванням електричної енергії для живлення систем керування та допоміжного обладнання транспортного засобу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасних умовах розвитку транспортної галузі особливого значення набуває підвищення енергоефективності транспортних засобів та зменшення їхнього впливу на довкілля. Одним із перспективних рішень є застосування теплових насосів у системах клімат-контролю автомобілів, особливо електромобілів.

У роботі досліджено принципи побудови та функціонування резонансного автомобільного теплового насоса як складової системи терморегулювання транспортних засобів. Проведено теоретичний аналіз впливу резонансних явищ на ефективність теплового насоса. Запропоновано

математичну модель процесу та визначено умови досягнення резонансного режиму. Обґрунтовано перспективи використання технології в електромобілях і гібридних транспортних засобах.

Резонансний автомобільний тепловий насос є перспективною технологією підвищення енергоефективності транспортних засобів. Використання резонансних режимів дозволяє суттєво знизити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи системи [5].

Загальна схема запропонованого транспортного резонансного теплового насоса наведена на рисунку 1. Пристрій здійснює перетворення енергії в послідовності термодинамічних та механічних процесів, що забезпечують циркуляцію робочого тіла та перенесення теплової енергії.

У ресивері (1) відбувається випаровування робочої речовини до встановлення термодинамічної рівноваги між паровою та рідкою фазами при температурі навколишнього середовища T_1 . У процесі випаровування відбувається інтенсивне охолодження робочого тіла, внаслідок чого його внутрішня енергія знижується до рівня, що відповідає температурі $T_2 < T_1$. За таких умов формується напрямлений потік теплової енергії від радіатора (3) до ресивера (1).

Підтримання температурного режиму радіатора (3) здійснюється за рахунок примусової конвекції повітря, яка забезпечується вентилятором (2). Сукупність елементів (1–3) формує базовий контур теплового насоса, що забезпечує відбір тепла з навколишнього середовища.

При досягненні в ресивері (1) температури T_1 відкривається клапан (4), після чого пари робочого тіла надходять до системи парового двигуна під підвищеним тиском. Паровий двигун містить один або декілька робочих циліндрів (5), у яких кожен хід поршня виконує корисну механічну роботу.

У процесі адіабатичного розширення відбувається зниження температури пари та її часткова конденсація. Після завершення робочого ходу поршня відкривається клапан (6), і утворена рідка фаза за допомогою насоса (10) повертається до базового контуру теплового насоса (1–3) після додаткового охолодження в магнітодинамічній системі (7–8–9).

Таким чином, запропонована схема забезпечує послідовне перетворення теплової енергії навколишнього середовища у механічну роботу з подальшим її використанням у транспортній енергетичній системі.

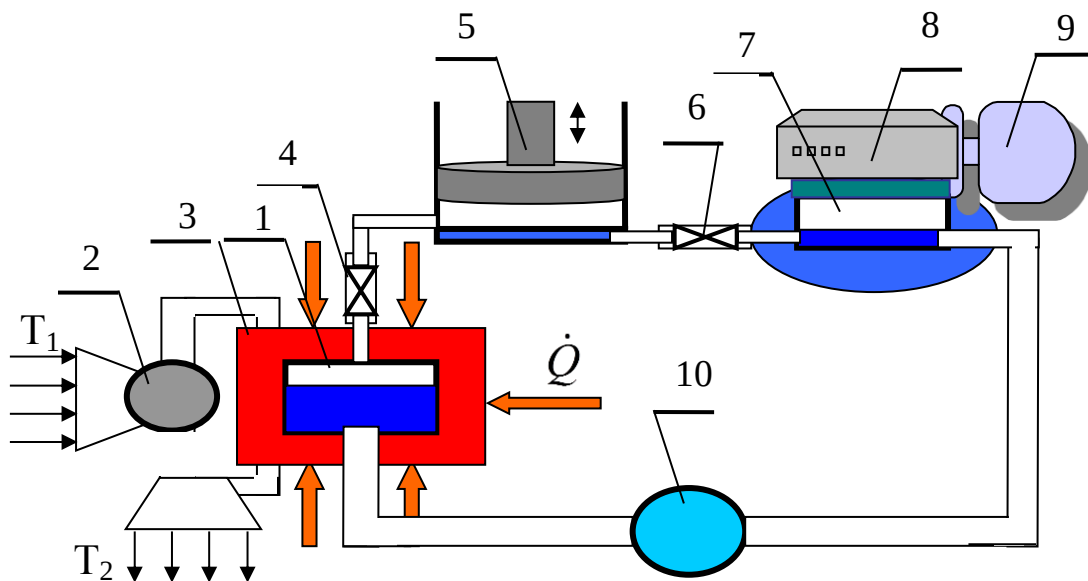


Рисунок 1. – Схема запропонованого транспортного резонансного теплового насоса: ресивер 1, вентилятор повітря 2, водяний радіатор 3, високотемпературний вентиль 4, робочий циліндр парового двигуна 5, низькотемпературний вентиль 6, магнітодинамічний мотор-генератор 7, резонансний контур магнітодинамічного мотор-генератора 8, генератор електричної енергії 9, рідинний електронасос 10, температури навколишнього середовища T_1 , температура внутрішньої енергії T_2 .

Загальна кінематична схема резонансного транспортного теплового автомобільного насоса описує послідовність перетворення енергії та рух робочого тіла в межах системи. У ресивері (1) відбувається випаровування робочої рідини з утворенням пари. Вентилятор (2) забезпечує примусову циркуляцію повітря через водяний радіатор (3), який здійснює теплопередачу від повітряного потоку

до робочого тіла теплового насоса. Високотемпературний клапан (4) регулює подачу пари високого тиску до циліндрів парового двигуна. Робочий циліндр парового двигуна (5) перетворює зворотно-поступальний рух поршня у обертальний рух основного вала двигуна, забезпечуючи генерацію механічної енергії. Низькотемпературний клапан (6) виконує функцію відведення утвореної робочої рідини до камери глибокого охолодження, яка пов'язана з магнітодинамічним мотор-генератором (7). Резонансний контур (8) магнітодинамічного мотор-генератора забезпечує інтенсифікацію тепловідведення від низькотемпературного теплообмінника шляхом резонансних процесів. Генератор електричної енергії (9) здійснює вироблення електроенергії для живлення системи керування та допоміжного електрообладнання резонансного транспортного теплового насоса. Рідинний електронасос (10) забезпечує циркуляцію робочої рідини всередині замкненого контуру теплового насоса, підтримуючи безперервність термодинамічного циклу.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Резонансний транспортний тепловий насос містить високотемпературний теплообмінник, паровий двигун та низькотемпературний теплообмінник, який відрізняється тим, що компресор у тепловому насосі замінено паровим двигуном, а для забезпечення більш глибокого охолодження робочої рідини застосовано низькообертовий резонансний магнітодинамічний мотор-генератор [6-7].

2. Резонансний транспортний тепловий насос за рис.1, який відрізняється тим, що високотемпературний теплообмінник з навколишнім середовищем виконано у вигляді послідовного процесу теплообміну: від повітряного потоку до водяного радіатора і від водяного радіатора до робочого тіла.

3. Резонансний транспортний тепловий насос за рис. 1, який відрізняється тим, що паровий двигун виконано у вигляді одного або декількох циліндрів із робочим ходом у прямому та зворотному напрямках.

4. Резонансний транспортний тепловий насос за рис. 1, який відрізняється тим, що резонансна магнітодинамічна система побудована на явищі резонансу струму та використовується для додаткового охолодження робочого тіла після проходження через паровий двигун.

5. Резонансний транспортний тепловий насос за п. 1, який відрізняється тим, що як робоче тіло використовуються рідкі речовини з низькою енергією зв'язку між кластерними структурами, що є співмірною із середньою тепловою енергією навколишнього повітря

Основні процеси циклу теплового резонансного насоса: випаровування, стиснення, конденсація, дроселювання. У резонансному тепловому насосі компресор працює на власній частоті, мінімізуються втрати на тертя та збільшується амплітуда коливань робочого середовища [8].

Переваги резонансного підходу полягають в підвищенні ККД, а робота в резонансі забезпечує мінімальні втрати енергії, зменшення навантаження на елементи системи, що знижує знос компресора та електроприводу, підвищує інтенсифікацію теплообміну. Коливальні процеси покращують теплопередачу.

Проблеми та обмеження резонансного підходу полягають у складності налаштування резонансних режимів, необхідності точного керування частотою, залежність від змінних умов експлуатації (температура, навантаження) та в недостатній кількості практичних досліджень на транспорті в даному підході.

ВИСНОВКИ

Резонансний автомобільний тепловий насос є перспективним напрямом розвитку транспортних енергетичних систем. Використання резонансних режимів дозволяє значно підвищити енергоефективність, знизити витрати енергії та забезпечити більш раціональне використання теплових потоків у транспортних засобах. Подальші дослідження у цьому напрямі можуть привести до створення принципово нових типів автомобільних енергосистем.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- розробку адаптивних систем керування резонансом;
- використання нанотехнологій та нових матеріалів;
- інтеграцію з електромобілями та автономними енергосистемами;
- створення резонансних електромеханічних перетворювачів нового покоління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Voloshchuk V. A., Nekrashevych O. V., Bohza M. S. Dynamic characteristics of an air-source heat pump system // ResearchGate. 2023.

2. Chaikovskaya E. I. Development of energy-saving technology for maintaining heat pump systems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5. С. 10–16.
3. Куць Н. Г. Транспорт і енергетичні комплекси з тепловими насосами : монографія. Харків : НТУ «ХП», 2014. 312 с.
4. Куць Н. Г. Транспортний гібридний енергокомплекс // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків : НТУ «ХП», 2015. № 10 (1119). С. 45–50.
5. Куць Н. Г. Спосіб роботи бортового енергоблока транспортного засобу : пат. на корисну модель Україна. № 99457 ; заявл. 10.1.2014 ; опубл. 10.06.2015. Бюл.№11.
6. International Energy Agency. Heat Pumps – Analysis and Outlook 2024. Paris : IEA, 2024. 220 p.
7. Denso Corporation. Thermal Management Systems for Electric Vehicles. Tokyo : Denso Corporation, 2023. 95 p.
8. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Гончарук С. М. Аналіз енергетичної ефективності теплових насосів // *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. 2018. № 10. С. 45–52.

REFERENCES

1. Voloshchuk, V. A., Nekrashevych, O. V., & Bohza, M. S. (2023). Dynamic characteristics of an air-source heat pump system. ResearchGate.
2. Chaikovskaya, E. I. (2018). Development of energy-saving technology for maintaining heat pump systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (5), 10–16.
3. Kuts, N. H. (2014). Transport and energy complexes with heat pumps. Kharkiv: NTU “KhPI”.
4. Kuts, N. H. (2015). Transport hybrid energy complex. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Automobile and Tractor Engineering*, (10(1119)), 45–50.
5. Kuts, N. G. Method of operation of an on-board power unit for a vehicle: Utility Model Patent of Ukraine No. 99457; filed Jan. 10, 2014; published June 10, 2015. Bulletin No. 11.
6. International Energy Agency. (2024). Heat pumps – Analysis and outlook 2024. Paris: IEA.
7. Denso Corporation. (2023). Thermal management systems for electric vehicles. Tokyo: Denso Corporation.
8. Basok, B. I., Davydenko, B. V., & Honcharuk, S. M. (2018). Analysis of energy efficiency of heat pump systems. *Technical Thermophysics and Industrial Heat Engineering*, (10), 45–52.

Kuts N.G. Resonant automotive heat pump: principle of operation, efficiency, and implementation prospects

The article investigates the concept of a resonant automotive heat pump as an innovative component of vehicle thermal management systems. The proposed system includes a heat exchanger for interaction between the working fluid and ambient air with extraction of low-grade heat, a steam engine serving as a primary or auxiliary drive in combination with an electric generator, as well as a system for preliminary cooling of the working fluid. In addition, a deep-cooling heat exchanger based on a magnetodynamic system is incorporated, which can operate either as an electric motor or as an auxiliary generator to supply power to control systems and auxiliary electrical equipment.

It has been established that the application of a resonant approach makes it possible to reduce energy losses, increase the coefficient of performance of the heat pump, and improve the overall energy efficiency of the vehicle. Particular attention is paid to the prospects of integrating resonant heat pumps into electric vehicles and hybrid transport systems in accordance with modern environmental and energy-saving requirements.

The physical principles of heat pump operation are analyzed, and the possibility of improving their efficiency through the use of resonant modes in mechanical, hydrodynamic, and electromagnetic subsystems is substantiated. A theoretical analysis of the influence of resonance on heat transfer processes and energy consumption is carried out, and a mathematical model describing the conditions for achieving the resonant operating mode of the compressor is proposed. It is shown that the use of resonant modes in combination with multi-channel energy conversion ensures improved system efficiency, intensification of heat and mass transfer processes, and reduction of energy losses. The proposed technical solution is aimed at more efficient conversion of various types of energy and a significant reduction in the weight and size characteristics of the vehicle power system.

An analysis of the physical fundamentals of heat pump operation in transport applications has been conducted, and the impact of resonant modes on improving their energy efficiency has been investigated. The feasibility of applying resonance phenomena in compressor, electromechanical, and hydrodynamic

systems of vehicles is substantiated. Prospects for integrating resonant heat pumps into modern electric and hybrid vehicles are identified.

Keywords: *heat pump, resonance, automobile, energy efficiency, coefficient of performance, thermal management, deep cooling.*

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Nadiia KYTS, PhD in Engeneering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Дата надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/nsn20y09>

Мармут І.А.¹, Зуєв В.О.²¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола**УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІС АВТОМОБІЛЯ З РОЛИКОВИМ ТЯГОВИМ СТЕНДОМ**

Як відомо, в даний час найбільше поширення одержали стенди з біговими барабанами (роликові стенди). При перевірці на них кожне колесо спирається на два рівнобіжних ролики невеликого діаметра. Вони досить прості по конструкції, компактні, створюють високі сили зчеплення в контактні шини з роликом, забезпечують стійке положення автомобіля при тягових випробуваннях, дозволяють здійснювати перевірку в сталих чи динамічних режимах, на різних швидкостях.

У більшості випадків на стенді одночасно перевіряються обидва колеса однієї осі. Такі стенди називаються одноосьовими. Схему стенда називають симетричною, якщо передні і задні ролики розташовані на одній висоті, несиметричною – у протилежному випадку. Часто передні і задні ролики кожної пари зв'язують між собою за допомогою механічної силової передачі – ланцюговою або клинопасовою.

Конструкція блоку роликів повинна забезпечувати реалізацію заданої тягової сили на ведучих колесах при перевірці; стійке положення автомобіля на стенді в процесі випробувань; можливість самостійного виїзду автомобіля після закінчення випробувань; не допускати підвищеного зносу шин при перевірці.

У статті розглянуті умови реалізації тягової сили, які визначаються схемами розташування роликів (симетричною та несиметричною) з урахуванням кутів між вертикаллю та лінією, яка з'єднує центри колеса та роликів – α , а також з урахуванням коефіцієнта зчеплення φ . Виконано аналіз залежності коефіцієнта використання навантаження q від кута α для різних схем розташування роликів.

Проаналізована взаємодія автомобіля зі стендом у режимах обкатування і навантаження та розроблені математичні моделі для розрахунку сил, які діють в системі «колесо-ролики». Аналіз сил взаємодії автомобіля зі стендом виконано для схем розташування роликів що не має механічної передачі між роликами та для схеми з механічною передачею.

Значення нормальних реакцій N_1 і N_2 необхідні для визначення конструктивних параметрів роликів блоку (розрахунки на міцність роликів, їхніх валів, вибір підшипникових опор тощо). Крім того, знання реакцій N_1 і N_2 допомагає оптимально розподілити інерційні маси між роликами стенда. Щоб виключити прослизання коліс щодо роликів, загальна інерційна маса повинна розподілятися між роликами стенда відповідно до розподілу нормальних реакцій.

Ключові слова: тяговий роликовий стенд, максимальна тягова сила, нормальна реакція, математична модель, крутний момент, коефіцієнт використання навантаження.

ВСТУП

Тягові роликові стенди призначені для визначення потужності і тягової сили на ведучих колесах автомобіля, або часу розгону у заданому швидкісному інтервалі. За їхньою допомогою також визначають втрати в трансмісії автомобіля, швидкість і моменти переключення гідromеханічної передачі, витрату палива при визначених навантажувальних і швидкісних режимах, виконують регулювання на нормативну токсичність відпрацьованих газів тощо. При випробуваннях автомобіля на тяговому стенді можна перевірити роботу трансмісії, спідометра, лічильника пройденого шляху, тахометра й оцінити технічний стан ходової частини автомобіля по параметрах шуму, вібрації і нагрівання окремих агрегатів. Основною частиною тягового стенду є опорний пристрій. Опорний пристрій тягового стенда складається з блоку роликів, пристрою в'їзду і виїзду, інерційних мас (для інерційних і інерційно-силових стендів), навантажувального пристрою (для силових і інерційно-силових стендів).

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Конструкція блоку роликів повинна забезпечувати реалізацію заданої тягової сили на ведучих колесах при випробуванні; стійке положення автомобіля на стенді в процесі випробування; можливість самостійного виїзду автомобіля після закінчення випробувань; не допущення підвищеного зносу шин при перевірках. Дотримання цих вимог залежить від схеми розташування роликів (симетрична чи несиметрична), розташування робочого ролика щодо колеса автомобіля (переднє чи заднє), коефіцієнта зчеплення (між поверхнями шин і ролика), діаметра ролика і відстані між ними [1].

Можливе симетричне розташування роликів, коли вони знаходяться на одному рівні, і несиметричне, коли один з роликів розташований вище іншого. Умова стійкого положення автомобіля на стенді характеризується сталістю контакту шини з обома (переднім і заднім) роликами

в процесі випробування.

Умова усунення підвищеного зносу шин забезпечується правильним вибором діаметра роликів і режиму випробувань. Стенди з опорою колеса на два ролики невеликого діаметра мають ряд переваг у порівнянні зі стендами, у яких одне колесо спирається на один барабан великого діаметра (менші габаритні розміри, маса, відсутні спеціальні пристосування, що утримують автомобіль). Але робота шини, що спирається на два ролики, супроводжується підвищеною деформацією і, як наслідок, сильним нагріванням шини. При цьому необхідно обмежувати швидкість і тривалість випробувань.

Від правильного вибору діаметра роликів залежить знос шин при випробуваннях на стенді й умови імітації дорожніх опорів. Зменшення діаметра роликів, що порозумівається прагненням знизити габаритні розміри і масу стенда, приводить до підвищення деформації, прослизання шин і, отже, до збільшення їхнього зносу. У тягових стендах для експлуатаційних випробувань діаметр роликів коливається в межах від 220 до 500 мм. Відповідно до вимог ДСТУ 3333-96 [2] діаметр роликів повинний бути не менш 220 мм. Для експлуатаційних стендів рекомендується застосовувати ролики діаметром 220 мм для швидкостей до 160 км/год, 320 мм – до 200 км/год, 400 мм – до 230 км/год і 510 мм – до 250 км/год.

Основні аспекти взаємодії пневматичної шини з плоскою поверхнею дороги, з циліндричною поверхнею роликів діагностичного стенда були досліджені в багатьох роботах. В роботі [3] розглянуто моделювання динаміки взаємодії колеса з плоскою поверхнею для всюдихідних транспортних засобів. Розроблений метод здатний оцінювати як поздовжні, так і поперечні сили для розрахунку тягового зусилля транспортних засобів на дорозі. У статті [4] представлені дослідження взаємодії транспортного засобу та динамометричного стенду, що об'єднує експериментальні та фізичні теорії. Виконано аналіз ковзання і втрат в системі та опір коченню, що дозволяє краще відобразити реальну систему «автомобіль-роликовий стенд».

В роботі [5] виконаний аналіз функціональних властивостей взаємодії контакту шини з дорогою з метою зменшення шуму та опору коченню. В роботі [6] виконано моделювання поведінки контакту шин з дорожнім покриттям (тобто розподіл контактного зчеплення на межі розділу). Це відіграє важливу роль в аналізі характеристик дорожнього покриття та безпеки руху транспортних засобів.

Робота [7] присвячена експериментальному дослідженню особливостей взаємодії колеса з транспортним засобом та їх наслідки для опору. Робота [8] присвячена дослідженню несучої здатності коліс транспортних засобів до бічних та поздовжніх сил з дорожнім покриттям, які здатні рухати транспортний засіб та контролювати його траєкторію.

В роботі [9] розглянуто особливості взаємодії високожорсткої шини з опорною поверхнею під час початкового періоду руху. У цій статті [10] розглядається вплив пружно-демпфуючих властивостей зношених коліс на результати оцінки технічного стану (динамічних властивостей) автомобільних підвісок, проведеної на діагностичній лінії на стендах з діагностування ходової частини.

В роботі [11] розглянуто вплив характеристик шин на керованість та стійкість автомобіля на дорозі. Головною метою роботи [12] є аналіз впливу шини на взаємодію транспортного засобу та дороги з метою вибору більш поширених, але достатньо точних моделей шин.

У статті [13] порівнюються результати випробувань опору коченню коліс, проведених у дорожніх умовах, з результатами лабораторних випробувань, проведених на барабанних стендах. Огляд результатів показує, що результати випробувань, проведених відповідно до стандартів ISO та SAE на сталевих барабанах, дуже погано корелюють з більш об'єктивними результатами дорожніх випробувань. Автори рекомендують замінити гладку поверхню сталевого барабана на поверхню з текстурою, що відповідає вигляду доріг та автомагістралей у Європі та США.

У роботі [14] представлено метод визначення сил, що діють на шини для одночасного гальмування, поворотів та розвалу, шляхом поєднання емпіричних моделей для чистої поведінки кожної з відповідних дій на дорозі. В основному всі наведені дослідження стосувалися втрат на кочення шини по плоскій опорній поверхні (дорозі). Окремі питання взаємодії шини з роликом, зокрема, зчеплення шини з робочою поверхнею досліджувалися в роботі [15].

До теперішнього часу досить добре вивчена механіка взаємодії з роликами ізолюваного колеса, навантаженого вертикальною силою і крутним або гальмівним моментом. Однак, при переході до аналізу взаємодії зі стендом, колеса автомобіля однієї осі якого спираються на ролики, а іншої (вільної) – на плоску поверхню підлоги поста діагностування, виникають значні утруднення. Вони

зв'язані з тим, що через наявність трьох опор (два ролики і підлога), а також пружних елементів, задача є статично невизначеною. У той же час, як показано в [15], вплив коліс вільної осі випробовуваного автомобіля, що виявляється у виді горизонтальної сили, прикладеної до випробовуваної осі з боку кузова (рамі) автомобіля, істотно змінює розподіл радіальних сил у контакті з роликами. Це у свою чергу, визначає можливі значення реалізованих на стенді крутних і гальмівних моментів. Крім того, при випробуванні коліс тільки однієї осі відбувається перерозподіл вертикальних навантажень на колеса автомобіля. Ще складніше йде справа при наявності механічної передачі, що зв'язує передні і задні ролики. Тому що при цьому виникає замкнутий силовий контур, де можлива циркуляція потужності. Нарешті, самим складним випадком є взаємодія автомобіля з роликами повноопорного стенда, тобто такого, на якому всі колеса випробуються одночасно.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

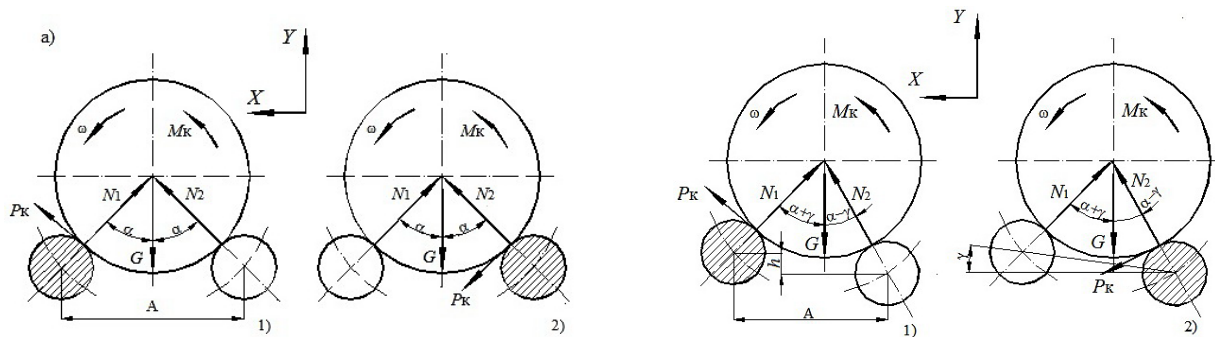
Таким чином, першочерговою ціллю дослідження варто назвати розробку математичних моделей взаємодії автомобіля з роликовим стендом при різних режимах роботи. Задачі дослідження: аналіз впливу характеристик стендів і елементів зв'язку між роликами на вихідні параметри діагностичної системи «автомобіль-стенд»; обґрунтування вимог до діагностичних стендів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Умови реалізації тягової сили

Звичайно тягові стенди розраховують на реалізацію максимально можливої тягової сили при випробуваннях автомобіля на прямій передачі. Такий режим прийнятий виходячи з основного призначення стенда – визначення параметрів тягово-швидкісних властивостей і паливної економічності, а також з метою усунення підвищених навантажень на силову передачу автомобіля і стенд. Однак, при необхідності, на стенді можуть проводитися випробування на будь-якій передачі. В цьому випадку стенд повинний бути розрахований на реалізацію заданої тягової сили, що розвивається на колесах на цих передачах.

Умова реалізації тягової сили визначається схемою розташування роликів, а також кутами α , γ і коефіцієнтом зчеплення ϕ . Розглянемо дві можливих схеми розташування роликів тягового стенда. На рис. 1а представлена схема симетричного розташування роликів, а на рис. 1б – схема несиметричного розташування роликів.



1) при передньому робочому ролику; 2) при задньому робочому ролику

M_K – крутний момент, A – міжосьова відстань, h – висота між осями роликів, G – вертикальне навантаження на колесо, P_K – тягове зусилля на колесі, N_1 , N_2 – реакції на роликах стенда

Рисунок 1 – Схема симетричного (а) та несиметричного (б) розташування роликів

З метою спрощення аналізу особливостей взаємодії ведучого колеса автомобіля з роликами стенда не враховуються деформації шини від вертикального навантаження і тягової сили, а також опір коченню. Колесо передбачається відділеним від кузова автомобіля і не закріпленим на стенді.

Максимальна тягова сила $P_{K\max}$, яку можна реалізувати на стенді за умовами зчеплення, залежить від нормальної реакції і коефіцієнта зчеплення:

$$P_{K\max} = N \cdot \phi. \quad (1)$$

Тому при виборі в якості робочого переднього ролика можна реалізувати внаслідок його довантаження велику (за умовами зчеплення) тягову силу.

Формули для визначення P_{Kmax} і відповідних їм значень N_1 і N_2 для симетричних схем приведені в таблиці 1, а для несиметричних схем – в таблиці 2.

Таким чином, в обох випадках, тобто при передньому і задньому робочих роликах, передній навантажується більшою нормальною силою, чим задній. Це справедливо для всіх кутів, що задовольняють умові $\alpha \leq 45^\circ$. Слід зазначити, що стенди з кутами $\alpha > 45^\circ$ не застосовуються.

Таблиця 1 – Формули для визначення реалізованої тягової сили і нормативних реакцій при розрахунку тягових стендів симетричної схеми

Схема розташування роликів	Параметр	Розрахункова формула
Передній ведучий ролик	N_1	$\frac{G \cdot \sin \alpha}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	N_2	$\frac{G(\sin \alpha - \varphi \cdot \cos \alpha)}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	P_{Kmax}	$\frac{G \cdot \varphi \cdot \sin \alpha}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
Задній ведучий ролик	N_1	$\frac{G(\sin \alpha + \varphi \cdot \cos \alpha)}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	N_2	$\frac{G \cdot \sin \alpha}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	P_{Kmax}	$\frac{G \cdot \varphi \cdot \sin \alpha}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$

Таблиця 2 – Формули для визначення реалізованої тягової сили і нормативних реакцій при розрахунку тягових стендів несиметричної схеми з урахуванням кута γ

Схема розташування роликів	Параметр	Розрахункова формула
Передній ведучий ролик	N_1	$\frac{G \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	N_2	$\frac{G \cdot (\sin(\alpha - \gamma) - \varphi \cdot \cos(\alpha - \gamma))}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	P_{Kmax}	$\frac{G \cdot \varphi \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\sin 2\alpha - \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
Задній ведучий ролик	N_1	$\frac{G \cdot (\sin(\alpha + \gamma) + \varphi \cdot \cos(\alpha + \gamma))}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	N_2	$\frac{G \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$
	P_{Kmax}	$\frac{G \cdot \varphi \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{\sin 2\alpha + \varphi \cdot \cos 2\alpha}$

Значення нормальних реакцій N_1 і N_2 необхідні для визначення конструктивних параметрів блоку роликів (розрахунки на міцність роликів, їхніх валів, вибір підшипникових опор і т.д.). Крім того, знання реакцій N_1 і N_2 допомагає оптимально розподілити інерційні маси між роликами інерційного стенда. Щоб виключити прослизання коліс щодо роликів, загальна інерційна маса повинна розподілятися між роликами стенда відповідно до розподілу нормальних реакцій.

При заданих радіусах ролика r_p і колеса r_k визначають відстань між осями роликів:

для симетричних: $L_C = 2(r_p + r_k) \cdot \sin \alpha$;

для несиметричних: $L_H = (r_p + r_k) \cdot (\sin(\alpha + \gamma) + \sin(\alpha - \gamma))$;

$h = (r_p + r_k) \cdot (\cos(\alpha - \gamma) - \cos(\alpha + \gamma))$.

Різні схеми стендів порівнюються між собою в частині реалізованої ними тягової сили за коефіцієнтом використання навантаження q (відношення максимальної тягової сили до навантаження на колесо) [1]: $q_K = P_K / G$.

На рис. 2 та рис. 3 представлені залежності коефіцієнта використання навантаження q від кута α для різних схем розташування роликів стенда симетричної та несиметричної схеми відповідно.

Значення кута α у стендах для легкових автомобілів коливаються від 27° до 40° . Кути менше 27° не забезпечують стійкість автомобіля, а кути більше 40° не використовуються по конструктивних розуміннях (при великих відстанях між роликами легковий автомобіль може торкатися їх днищем).

Для цих значень кута α найбільше значення коефіцієнта використання навантаження буде при схемі з переднім ведучим роликом, що найбільш оптимальна і часто використовується в тягових стендах.

Значення вертикального навантаження при випробуванні автомобіля під дією тягової сили змінюється і перерозподіляється по мостах автомобіля. При цьому задній міст розвантажується, а передній довантажується. Для довгобазних автомобілів зміна коефіцієнта q_K не перевищує 3...4%, для короткобазних автомобілів (наприклад, типу «самоскид») зміна коефіцієнта q_K може досягти 8...10%.

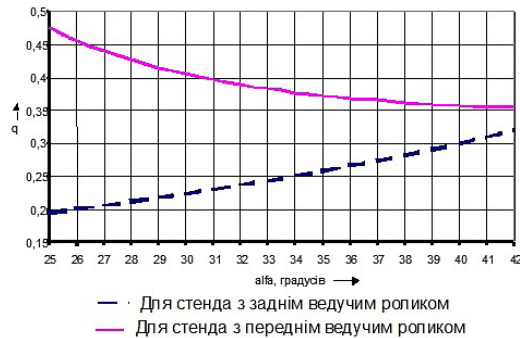


Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта q використання навантаження від кута α для різних схем розташування роликів стенда симетричної схеми

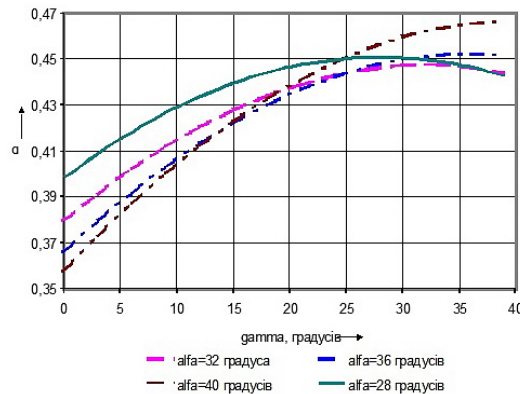


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнта q використання навантаження від кута γ для різних схем розташування роликів стенда несиметричної схеми

2. Взаємодія автомобіля зі стендом у режимах обкатування і навантаження

Режим обкатування – це стале обертання коліс однієї з осей автомобіля, встановленої на роликах стенда, під дією крутного моменту, який підводиться від двигуна стенда або автомобіля. Режим навантаження – це стале обертання ведучих коліс під дією крутного моменту, який підводиться від двигуна автомобіля M_K , при наявності навантаження, тобто гальмівного моменту M_T , підведеного до робочих роликів з боку навантажувального пристрою стенда. Розглянемо взаємодію колеса в режимі навантаження зі стендом без зв'язку; робочі ролики – передні (рис. 4).

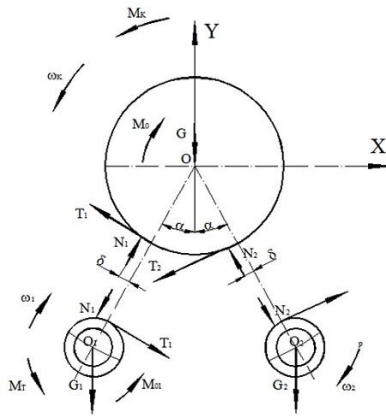


Рисунок 4 – Взаємодія колеса з роликами в режимі навантаження

Позначення, крім використаних раніше:

- $\omega_k, \omega_1, \omega_2$ – кутові швидкості відповідно колеса і роликів, c^{-1} ;
- M_o, M_{o1}, M_{o2} – моменти сил тертя в осях колеса і роликів, Н·м;
- G_1, G_2 – вага, що приходить на передній і задній ролик, відповідно Н;
- δ – плече опору коченню шини по роликам, м;
- r_1, r_2 – радіус шини в контакт з переднім і заднім роликами, м.

Між силами, що діють на колесо і ролик, маються наступні співвідношення:

$$\sum X = N_1 \cdot \sin \alpha_1 - N_2 \cdot \sin \alpha_2 - T_1 \cdot \cos \alpha_1 - T_2 \cdot \cos \alpha_2 = 0; \quad (2)$$

$$\sum Y = N_1 \cdot \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \cos \alpha_2 + T_1 \cdot \sin \alpha_1 - T_2 \cdot \sin \alpha_2 - G = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_o = M_k - M_o - T_1 \cdot r_1 - T_2 \cdot r_2 - N_1 \cdot \delta - N_2 \cdot \delta = 0; \quad (4)$$

$$\sum M_{o1} = T_1 \cdot r_p - M_{o1} - M_t - N_1 \cdot \delta = 0; \quad (5)$$

$$\sum M_{o2} = T_2 \cdot r_p - M_{o2} - N_2 \cdot \delta = 0. \quad (6)$$

Ці п'ять рівнянь містять п'ять невідомих – N_1, N_2, T_1, T_2 і M_k . Величина M_t відома. Вона вимірюється при діагностуванні. Моменти опорів в осях колеса і роликів знаходяться за наступними залежностями:

$$M_o = |\overline{G} + \overline{T_1} + \overline{T_2}| \cdot \rho \cdot f; \quad M_{o1} = |\overline{G_1} + \overline{N_1} + \overline{T_1}| \cdot \rho_1 \cdot f; \quad M_{o2} = |\overline{G_2} + \overline{N_2} + \overline{T_2}| \cdot \rho_2 \cdot f, \quad (7)$$

де ρ, ρ_1, ρ_2 – радіуси колеса і роликів, м;

f – приведений коефіцієнт тертя в опорах колеса і роликів (тому що в опорах установлені підшипники кочення, $f = 0,002 \dots 0,008$ в залежності від типу підшипників).

З огляду на те, що $T_2 \ll T_1, T_2 \ll G, T_2 \ll N_2, G_1 \ll N_1$, вираження моментів можна записати у вигляді:

$$M_o \approx |\overline{G} + \overline{T_1}| \cdot \rho \cdot f; \quad M_{o1} \approx |\overline{N_1} + \overline{T_1}| \cdot \rho_1 \cdot f; \quad M_{o2} \approx |\overline{G_2} + \overline{N_2}| \cdot \rho_2 \cdot f. \quad (8)$$

Звідси знаходимо:

$$T_1 = \frac{M_T + N_1 \cdot \delta + \sqrt{N_1^2 + T_1^2} \cdot \rho_1 \cdot f}{r_p}; \quad T_2 = \frac{N_2 \cdot \delta_2}{r_p}, \quad (9)$$

де $\delta_2 = \delta + \rho_2 \cdot f$.

З огляду на малість останнього доданка у вираженні для T_1 , можна записати: $\sqrt{N_1^2 + T_1^2} \approx \alpha \cdot T_1$.

Тоді $T_1 = \frac{M_T + N_1 \cdot \delta_1}{r_p}$, де $\delta_1 = \delta + \alpha \cdot \rho_1 \cdot f$.

Підставимо отримані вираження в рівняння статки:

$$N_1 \cdot \sin \alpha_1 - N_2 \cdot \sin \alpha_2 - \frac{M_T}{r_p} \cdot \cos \alpha_1 - N_1 \frac{\delta_1}{r_p} \cdot \cos \alpha_1 - N_2 \frac{\delta_2}{r_p} \cdot \cos \alpha_2 = 0; \quad (10)$$

$$N_1 \cdot \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \cos \alpha_2 + \frac{M_T}{r_p} \cdot \sin \alpha_1 + N_1 \frac{\delta_1}{r_p} \cdot \sin \alpha_1 + N_2 \frac{\delta_2}{r_p} \cdot \sin \alpha_2 - G = 0. \quad (11)$$

Звідси знаходимо вираження для N_1 і N_2 :

$$N_1 = \frac{G \left(\sin \alpha_2 + \frac{\delta_2}{r_p} \cdot \cos \alpha_2 \right) + \frac{M_T}{r_p} \left[\cos(\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{\delta_2}{r_p} \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \right]}{\left(1 + \frac{\delta_1 \cdot \delta_2}{r_p^2} \right) \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\delta_2 - \delta_1}{r_p} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (12)$$

$$N_2 = \frac{G \left(\sin \alpha_1 - \frac{\delta_1}{r_p} \cdot \cos \alpha_1 \right) - \frac{M_T}{r_p}}{\left(1 + \frac{\delta_1 \cdot \delta_2}{r_p^2} \right) \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\delta_2 - \delta_1}{r_p} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (13)$$

Тепер можна виразити через відомі величини T_1 , T_2 і M_k . Попередньо відзначимо, що при допущенні $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$ помилка у визначенні N_1 і N_2 не перевищує 2%; $\delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta$, тому що в сумарному опорі основну частку складають втрати на кочення шини по роликах. Тоді T_1 , T_2 і M_k описуються наступними рівняннями:

$$T_1 = \frac{M_T}{r_p} + f_k \cdot \frac{G(\sin \alpha_0 + f_k \cdot \cos \alpha_0) + \frac{M_T}{r_p}}{\sin 2\alpha_0}; \quad (14)$$

$$T_2 = f_k \cdot \frac{G(\sin \alpha_0 - f_k \cdot \cos \alpha_0) - \frac{M_T}{r_p}}{\sin 2\alpha_0}; \quad (15)$$

$$M_k = M_0 + \frac{M_T}{r_p} [r_k - f_k \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (r_k + r_p)] + G \cdot f_k \cdot \frac{r_k + r_p}{\cos \alpha}, \quad (16)$$

де $r \approx r_1$, $r_2 \approx r_1$;

$f_k = \delta/r_p$ – коефіцієнт опору кочення шини по ролику.

Режим обкатування з приводом від двигуна автомобіля (“гаряче обкатування”) описується тими ж виразами при $M_T = 0$.

Для розрахунку сил і моментів у режимі “холодного обкатування” (привод від стенда) знаходять M_T , приймаючи $M_k = 0$, після чого визначають інші величини.

При діагностуванні тягових властивостей вимірюють діагностичний параметр – крутний момент на навантажувальному пристрої, тобто M_T . Очевидно, діагноз можна вважати достовірним

доти, поки зберігається відома залежність M_T від M_K . Це характерно при відсутності прослизання шини по робочому ролику. Умова відсутності прослизання: $T_1 = \varphi \cdot N_1$,

Після підстановки і перетворень:

$$M_T \leq \frac{G \cdot r_p \cdot (\sin \alpha + f_K \cdot \cos \alpha)}{\frac{\sin 2\alpha}{\varphi - f_K} - \cos 2\alpha}. \quad (17)$$

Не менш важливе питання – це стійкість автомобіля на стенді при навантажувальних випробуваннях, тобто неможливість переїзду колеса через передній ролик. Умова стійкості: $N_2 \geq 0$.

Вище було отримане вираження для N_2 . Очевидно, що умова буде виконана, якщо чисельник не буде негативним: $G \cdot \left(\sin \alpha_1 - \frac{\delta_1}{r_p} \cdot \cos \alpha_1 \right) - \frac{M_T}{r_p} \geq 0$. Звідси критичне значення M_T (найбільше):

$$M_{T\max} = G_T \cdot r_p \left(\sin \alpha_1 - \frac{\delta_1}{r_p} \cdot \cos \alpha_1 \right). \quad (18)$$

Перейдемо до аналізу сил взаємодії автомобіля зі стендом, що має механічну передачу між роликми (ланцюгова, з радіусом зірочок – r_{zp} (рис. 5).

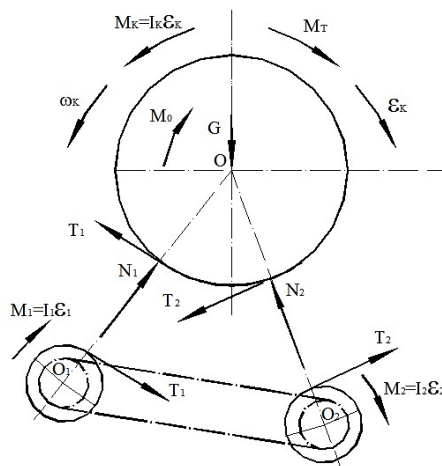


Рисунок 5 – Схема функціональних сил тягового стенда

Як було показано вище, точність знижується незначно при ряді допущень: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$; $\delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta$; $f \approx 0$. Для спрощення наступних виразів скористаємося цими допущеннями. Між діючими силами мають наступні співвідношення:

$$\sum X = N_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) - N_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma) - T_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma) + T_2 \cdot \cos(\alpha - \gamma) = 0; \quad (19)$$

$$\sum Y = N_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma) + N_2 \cdot \cos(\alpha - \gamma) + T_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) - T_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma) - G = 0; \quad (20)$$

$$\sum M_O = M_K - (T_1 + T_2) \cdot r = 0; \quad (21)$$

$$\sum M_{O1} = T_1 \cdot r_p - M_T + S \cdot r_{zp} + I_1 \cdot \epsilon_1 = 0; \quad (22)$$

$$\sum M_{O2} = T_2 \cdot r_p + S \cdot r_{zp} + I_2 \cdot \epsilon_2 = 0; \quad (23)$$

$$P = \frac{1}{2} N_1^2 \cdot \lambda_p + \frac{1}{2} N_2^2 \cdot \lambda_p + \frac{1}{2} T_1^2 \cdot \lambda_p + \frac{1}{2} T_2^2 \cdot \lambda_T + \frac{1}{2} S^2 \cdot \lambda_c. \quad (24)$$

П'ять рівнянь містять шість невідомих: N_1 , N_2 , T_1 , T_2 , M_K і S (як і раніше $S = S_2 - S_1$).

Складаємо рівняння потенційної енергії деформацій пружних елементів системи.

Вибираємо в якості зайвої невідомий S . Виражаємо через S інші невідомі:

$$T_1 = \frac{M_T - S \cdot r_{3p} - I_1 \cdot \varepsilon_1}{r_p}, \quad (25)$$

$$T_2 = \frac{S \cdot r_{3p} - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p}, \quad (26)$$

$$M_K = \frac{M_T \cdot r_K}{r_p}, \quad (27)$$

$$N_1 = \frac{G}{2 \cos \alpha} + \frac{M_T}{r_p \cdot \operatorname{tg} 2\alpha} + S \cdot \frac{r_{3p}}{r_p} \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{I_1 \cdot \varepsilon_1}{r_p \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}, \quad (28)$$

$$N_2 = \frac{G}{2 \cos \alpha} - \frac{M_T}{r_p \cdot \sin 2\alpha} + S \cdot \frac{r_{3p}}{r_p} \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}. \quad (29)$$

Використовуючи ці вираження, записуємо умову мінімуму P , як функції S , диференціюємо й отримане рівняння вирішуємо відносно S . Після перетворення одержуємо:

$$S = \frac{\frac{M_T - I_1 \cdot \varepsilon_1 - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p} (\lambda_T + \lambda_p \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) - G \cdot \lambda_p \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha}}{2(\lambda_T + \lambda_p \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \frac{r_{3p}}{r_p} + \lambda_c}, \quad (30)$$

Або, увівши позначення $\lambda_{ш} = \lambda_T + \lambda_p \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha$, одержуємо більш компактне вираження:

$$S = \frac{\frac{M_T - I_1 \cdot \varepsilon_1 - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p} \cdot \lambda_{ш} - G \cdot \lambda_p \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha}}{2\lambda_{ш} \cdot \frac{r_{3p}}{r_p} + \lambda_c}. \quad (31)$$

Звідси:

$$T_1 = \frac{\frac{M_T - I_1 \cdot \varepsilon_1}{r_p} \left(\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \right) + G \cdot \lambda_p \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha}}{2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}}}, \quad (32)$$

$$T_2 = \frac{\frac{M_T - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p} \cdot \lambda_{ш} - G \cdot \lambda_p \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha}}{2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}}}, \quad (33)$$

$$N_1 = G \cdot \frac{\lambda_{ш} + \frac{\lambda_c}{2} \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} - \lambda_p \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{\cos \alpha \left(2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \right)} + \frac{M_T - I_1 \cdot \varepsilon_1 - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p} \cdot \frac{\lambda_{ш} + \frac{\lambda_c}{2} \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha \left(2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \right)}, \quad (34)$$

$$N_2 = G \cdot \frac{\lambda_{ш} + \frac{\lambda_c}{2} \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} - \lambda_p \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{\cos \alpha \left(2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \right)} - \frac{M_T - I_1 \cdot \varepsilon_1 - I_2 \cdot \varepsilon_2}{r_p} \cdot \frac{\lambda_{ш} + \frac{\lambda_c}{2} \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}}{\operatorname{tg} \alpha \left(2\lambda_{ш} + \lambda_c \cdot \frac{r_p}{r_{3p}} \right)}. \quad (35)$$

Таким чином, показаний зв'язок між моментом на навантажувальному пристрої і крутним

моментом на ведучих колесах, а також діючими силами в системі «ролик-колесо».

На рис. 6 показана схема функціональних сил для інерційного стенда, на рис. 7 – взаємодія колеса з роликами стенда зі зв'язком в режимі навантаження.

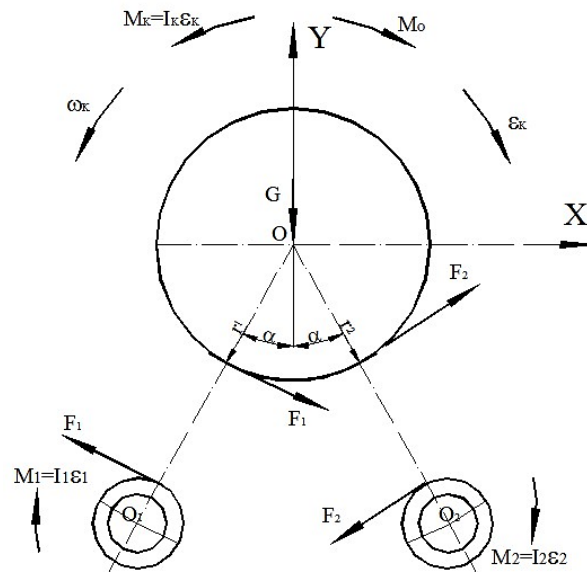


Рисунок 6 – Схема функціональних сил для інерційного стенда

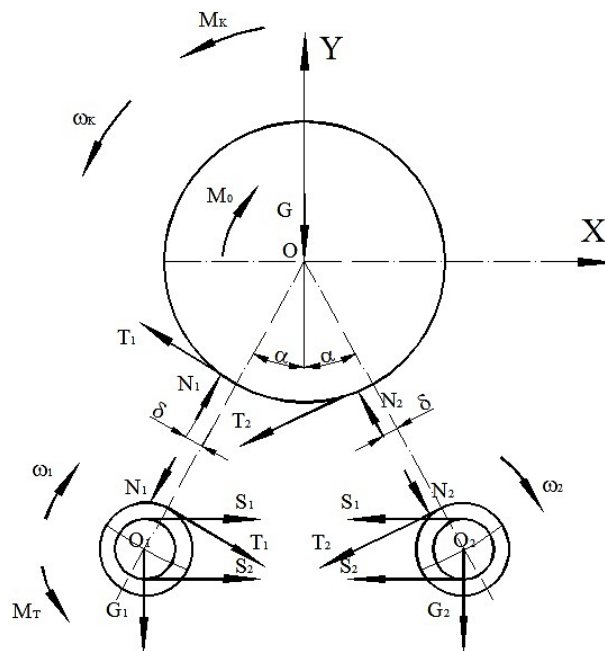


Рисунок 7 – Взаємодія колеса з роликами стенда зі зв'язком в режимі навантаження

На рис. 8 показані залежності коефіцієнта використання навантаження q від кута α для стенда симетричної схеми з переднім розташуванням роликів з урахуванням піддатливості шин і впливу інерційних мас.

Для вибору оптимального значення кута γ проаналізуємо кілька значень кута α : 27, 31, 35 і 39°. На рис. 9 показані залежності коефіцієнта q використання навантаження від кута γ для стенда несиметричної схеми з переднім розташуванням роликів з урахуванням піддатливості шин і впливу інерційних мас.

При визначенні конструктивних параметрів блоку роликів за заданим значенням тягової сили, що потрібно реалізувати на стенді, вибирають схему розташування роликів і ведучий ролик та визначають значення кута α .

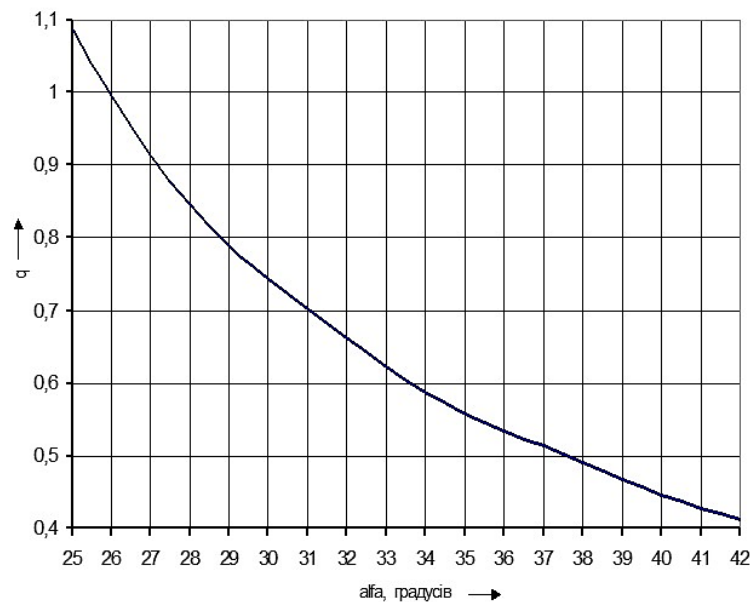


Рисунок 8 – Залежності коефіцієнта q використання навантаження від кута α для стенда симетричної схеми з переднім розташуванням роликів з урахуванням піддатливості шин і впливу інерційних мас

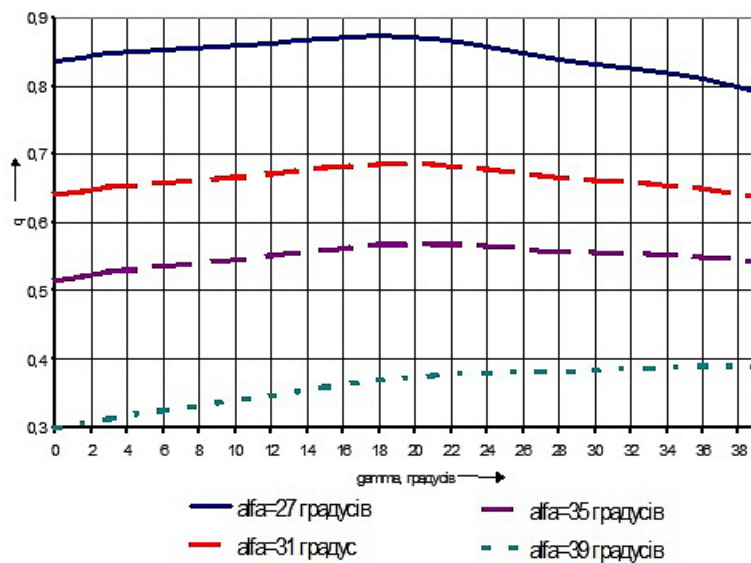


Рисунок 9 – Залежності коефіцієнта q використання навантаження від кута γ для стенда несиметричної схеми з переднім розташуванням роликів з урахуванням піддатливості шин і впливу інерційних мас

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сталість контакту шини з обома (переднім і заднім) роликами в процесі тягових випробувань автомобіля виключає можливість випадкового виїзду автомобіля зі стенда під дією тягової сили (стійкість у повздовжньому напрямку). Під дією тягової сили автомобіль у процесі випробування намагається виїхати зі стенда в напрямку руху, тобто через передній ролик. Нормальна реакція N_2 на задніх роликах при цьому зменшується. Для схем з передніми робочими роликами реакція N_2 звертається в нуль при значеннях кута α , що відповідають значенню $\tan \alpha = \varphi$. При цьому колесо втрачає контакт із заднім роликом і автомобіль може перекопитися через передній ролик і мимовільно з'їхати зі стенда. Отже, нерівність $\tan \alpha > \varphi$ треба розглядати як умову стійкого положення автомобіля на стенді з переднім робочим роликом. Для схем із заднім робочим роликом при будь-

яких значеннях $\alpha - N_2 > 0$. Таким чином, схеми із заднім робочим роликком завжди забезпечують стійке положення на стенді, що треба віднести до їхніх позитивних властивостей.

ВИСНОВКИ

1. Виведені формули для визначення максимальної тягової сили $P_{\text{кmax}}$ і відповідних їм значень N_1 і N_2 для симетричних і несиметричних схем тягових роликкових стендів.
2. Розроблені математичні моделі взаємодії коліс автомобіля з тяговим роликковим стендом у режимах обкатування і навантаження.
3. Показаний зв'язок між моментом на навантажувальному пристрої і крутним моментом на ведучих колесах, а також діючими силами в системі «ролик-колесо».
4. Значення нормальних реакцій N_1 і N_2 необхідні для визначення конструктивних параметрів блоку роликів. Крім того, знання реакцій N_1 і N_2 допомагає оптимально розподілити інерційні маси між роликами інерційного стенда відповідно до розподілу нормальних реакцій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Говорущенко М.Я., Волков В.П. та ін. (2009). Роликкові стенди для перевірки гальмівних та тягових властивостей автомобілів (теорія, розрахунок та конструювання). Харків: ХНАДУ, 344 с.
2. Стенди роликкові для перевірки гальмівних систем дорожніх транспортних засобів в умовах експлуатації. Загальні технічні вимоги. ДСТУ 3333-96. [Чинний від 1997-01-01]. Київ: Держстандарт України, 1996. 11 с. (Національні стандарти України). URL: https://dnaop.com/html/61155/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3333-96.
3. Tomasz Czapla and Mariusz Pawlak. Simulation of the Wheel-Surface Interaction Dynamics for All-Terrain Vehicles. Appl. Mech. 2022, 3(2), 360-374; <https://doi.org/10.3390/applmech3020022>.
4. Maria Augusta de Menezes Lourenco, Jony Javorski Eckert, Fabricio Leonardo Silvaa, Fabio Mazzariol Santiciolli, and Ludmila C. A. Silva. Vehicle and twin-roller chassis dynamometer model considering slip tire interactions. Mechanics based design of structures and machines 2023, Vol. 51, №. 11, 6166–6183. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2038199>.
5. Tiago Vieira. Doctoral Thesis in Building Sciences Tyre/road interaction. A holistic approach to the functional requirements of road surfaces regarding noise and rolling resistance. Stockholm, Sweden. 2020. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1427943/FULLTEXT02.pdf>.
6. Effect of Friction on Rolling Tire – Pavement Interaction. NEXTRANS Project № 019PY01 Technical Summar. USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report. <https://www.purdue.edu/discoverypark/cav/nextrans/completed-projects/docs/Final%20Report%20049.pdf>.
7. D. Bao, J. Borée, C. Sicot, C. Roebroek. Salient features of wheel-vehicle aerodynamic interactions: Consequences for drag. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236, pp.105366. 10.1016/j.jweia.2023.105366. hal-04028522. https://hal.science/hal-04028522v1/file/JWEIA_paper_final_version%20auteur_removed2.pdf.
8. Giancarlo Genta. Wheels and Tires. 2019, Mechanical Engineering Series. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35635-4_2.
9. Karpenko V., Voropay A., Czerepicky A., Neskreba E. (2024). Features of a high-stiffness tire interaction with a bearing surface during the starting period of motion. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 11(1), 2024, pp. E1–E8. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e1).
10. Andrzej Zuska and Jerzy Jackowski. Influence of Changes in Stiffness and Damping of Tyre Wheels on the Outcome of the Condition Assessment of Motor Vehicle Shock Absorbers. Energies 2023, 16, 3876. <https://doi.org/10.3390/en16093876>.
11. R. Wade Allen, Thomas T. Myers, Theodore J. Rosenthal and David H. Klyde. The Effect of Tire Characteristics on Vehicle Handling and Stability. SAE Transactions. Vol. 109, Section 6: Journal of passenger cars: Mechanical systems journal (2000), pp. 1039-1051 (13 pages). Published By: SAE International. <https://www.jstor.org/stable/44686944>.
12. Ariinas Rutka, Jonas Sapragonas. He role of a tire in vehicle and road interaction. Transport-2002, Vol XVII, No 2, 39-45. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/8732/7593>.
13. Jerzy Ejsmont, Grzegorz Ronowski, Lisa Ydrefors, Wojciech Owczarzak, Sławomir Sommer, Beata Świeczko- Żurek. Comparison of Tire Rolling Resistance Measuring Methods for Different Surfaces. International Journal of Automotive Technology (2024) 25:965–976. <https://doi.org/10.1007/s12239-024-00092-w> file:///E:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/s12239-024-00092-w.pdf.
14. Svendenius, J. (2007). Tire Modeling and Friction Estimation. [Doctoral Thesis (monograph),

Department of Automatic Control]. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University. <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4401399/27004.pdf>.

15. Рабінович Е.Х. Дослідження та вдосконалення методів та засобів стендової перевірки автомобільних гальм: дис... канд. техн. наук: 05.22.10. Харків, 1981. 229 с.

REFERENCES

1. Govorushchenko M., Volkov V.P. etc. (2009). Rolykovi stendy dlia perevirky halmivnykh ta tiahovykh vlastyvostei avtomobiliv (teoriia, rozrakhunok ta konstruiuvannia). [Roller stands for checking the braking and traction properties of automobiles (theory, calculations and design)]. Kharkov: Kharkov: KhNAHU [in Ukrainian].
2. Stendy rolykovi dlia perevirky halmivnykh system dorozhnikh transportnykh zasobiv v umovakh ekspluatatsii. Zahalni tekhnichni vymohy. [Roller stands for testing brake systems of road vehicles in operating conditions. General technical requirements]. (1996). DSTU 3333-96 from 01 January 1997. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian]. URL: https://dnaop.com/html/61155/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3333-96.
3. Tomasz Czapla and Mariusz Pawlak. Simulation of the Wheel-Surface Interaction Dynamics for All-Terrain Vehicles. Appl. Mech. 2022, 3(2), 360-374; <https://doi.org/10.3390/applmech3020022>.
4. Maria Augusta de Menezes Lourenco, Jony Javorski Eckert, Fabricio Leonardo Silvae, Fabio Mazzariol Santiciolli, and Ludmila C. A. Silva. Vehicle and twin-roller chassis dynamometer model considering slip tire interactions. Mechanics based design of structures and machines 2023, Vol. 51, №. 11, 6166–6183. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2038199>.
5. Tiago Vieira. Doctoral Thesis in Building Sciences Tyre/road interaction. A holistic approach to the functional requirements of road surfaces regarding noise and rolling resistance. Stockholm, Sweden. 2020. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1427943/FULLTEXT02.pdf>.
6. Effect of Friction on Rolling Tire – Pavement Interaction. NEXTRANS Project № 019PY01 Technical Summar. USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report. <https://www.purdue.edu/discoverypark/cav/nextrans/completed-projects/docs/Final%20Report%20049.pdf>.
7. D. Bao, J. Borée, C. Sicot, C. Roebroek. Salient features of wheel-vehicle aerodynamic interactions: Consequences for drag. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236, pp.105366. 10.1016/j.jweia.2023.105366. hal-04028522. https://hal.science/hal-04028522v1/file/JWEIA_paper_final_version%20auteur_removed2.pdf.
8. Giancarlo Genta. Wheels and Tires. 2019, Mechanical Engineering Series. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35635-4_2.
9. Karpenko V., Voropay A., Czerepicky A., Neskrebka E. (2024). Features of a high-stiffness tire interaction with a bearing surface during the starting period of motion. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 11(1), 2024, pp. E1–E8. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e1).
10. Andrzej Zuska and Jerzy Jackowski. Influence of Changes in Stiffness and Damping of Tyre Wheels on the Outcome of the Condition Assessment of Motor Vehicle Shock Absorbers. Energies 2023, 16, 3876. <https://doi.org/10.3390/en16093876>.
11. R. Wade Allen, Thomas T. Myers, Theodore J. Rosenthal and David H. Klyde. The Effect of Tire Characteristics on Vehicle Handling and Stability. SAE Transactions. Vol. 109, Section 6: Journal of passenger cars: Mechanical systems journal (2000), pp. 1039-1051 (13 pages). Published By: SAE International. <https://www.jstor.org/stable/44686944>.
12. Ariinas Rutka, Jonas Sapragonas. The role of a tire in vehicle and road interaction. Transport-2002, Vol XVII, No 2, 39-45. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/8732/7593>.
13. Jerzy Ejsmont, Grzegorz Ronowski, Lisa Ydrefors, Wojciech Owczarzak, Sławomir Sommer, Beata Świeczko-Żurek. Comparison of Tire Rolling Resistance Measuring Methods for Different Surfaces. International Journal of Automotive Technology (2024) 25:965–976. <https://doi.org/10.1007/s12239-024-00092-w> file:///E:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/s12239-024-00092-w.pdf.
14. Svendenius, J. (2007). Tire Modeling and Friction Estimation. [Doctoral Thesis (monograph), Department of Automatic Control]. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University. <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4401399/27004.pdf>.
15. Rabinovich, E.Kh. (1981). Doslidzhennia ta vdoskonalennia metodiv ta zasobiv stendovoi perevirky avtomobilnykh halm [Research and improvement of methods and means of bench testing of automobile brakes]. Candidate's thesis. Sumy: SumSU [in Ukrainian].

I. Marmut, V. Zuiev. Improvement of mathematical models of the interaction of vehicle wheels with a roller traction stand.

As is known, currently the most widespread are stands with running drums (roller stands). When testing on them, each wheel rests on two parallel rollers of small diameter. They are quite simple in design, compact, create high adhesion forces in contact between the tire and the roller, ensure a stable position of the car during traction tests, and allow testing in stable or dynamic modes, at different speeds.

In most cases, both wheels of one axle are tested simultaneously on the stand. Such stands are called single-axle. The stand layout is called symmetrical if the front and rear rollers are located at the same height, asymmetrical – otherwise. Often the front and rear rollers of each pair are connected to each other using a mechanical power transmission – chain or V-belt.

The design of the roller block must ensure the implementation of the specified traction force on the drive wheels during testing; a stable position of the car on the stand during testing; the ability of the car to leave independently after the end of the tests; and prevent increased tire wear during testing.

The article considers the conditions for the implementation of traction force, which are determined by the roller arrangement schemes (symmetrical and asymmetric) taking into account the angles between the vertical and the line connecting the centers of the wheel and rollers – α , as well as taking into account the adhesion coefficient φ . The dependence of the load utilization coefficient q on the angle α for different roller arrangement schemes is analyzed.

The interaction of the car with the stand in the running-in and loading modes was analyzed and mathematical models were developed to calculate the forces acting in the "wheel-roller" system. The analysis of the forces of interaction of the car with the stand was performed for roller arrangement schemes that do not have a mechanical transmission between the rollers and for a scheme with a mechanical transmission.

The values of the normal reactions N_1 and N_2 are necessary to determine the design parameters of the roller unit (calculations for the strength of the rollers, their shafts, selection of bearing supports, etc.). In addition, knowledge of the reactions N_1 and N_2 helps to optimally distribute the inertial masses between the rollers of the stand. To eliminate slipping of the wheels relative to the rollers, the total inertial mass must be distributed between the rollers of the stand in accordance with the distribution of the normal reactions.

Keywords: traction roller stand, maximum traction force, normal reaction, mathematical model, torque, load utilization factor.

МАРМУТ Ігор Арнольдович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. М.Я. Говорущенка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: mia2005.62@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

ЗУЄВ Володимир Олександрович, голова циклової комісії, викладач спеціальних дисциплін, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола, м. Тернопіль, e-mail: vlal.zuyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0596-8630>.

Ihor MARMUT, Ph. D. in Engineering, Associate Professor of Motor Vehicle Transport Systems Engineering Department named after M.Ya. Govorushchenka, Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: mia2005.62@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

Volodymyr ZUIEV, Chairman of the Cycle Committee, Teacher of Special Disciplines, Vyacheslav Chornovol Halych Vocational College, Ternopil, e-mail: vlal.zuyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0596-8630>.

Дата надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

<https://doi.org/10.36910/srt52b88>

Мельник В.М., Козак Ф.В.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВОГО ПАЛИВА З ТОВАРНИМ БЕНЗИНОМ В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ГБО 7-ГО ПОКОЛІННЯ**

Авторами виконано дослідження економічної ефективності використання біогазового пального у суміші із товарним бензином. У процесі використання природного газу на двигунах внутрішнього згоряння виникає ряд труднощів, що пов'язані з адаптацією двигуна та його систем. Проте, перспектива використання біогазового палива має істотну економічну та екологічну доцільність, а тому є надзвичайно важливою. До недавнього, забезпечити подачу одночасно рідкої і газоподібної фази палива було надзвичайно складно, проте газобалонне обладнання (ГБО) 7-го покоління для двигунів з прямим упорскуванням забезпечує подачу палива одночасно в рідкій фазі (через бензинові форсунки) та паровій фазі (у впускний колектор). А, отже дослідження економічної ефективності використання біогазового палива з товарним бензином в системі живлення ГБО 7-го покоління є досить актуальним. На початковому етапі нами отримано коефіцієнт, який враховує збільшення витрати паливної суміші через меншу теплотворну здатність біогазу. Із зростання частки біогазу в паливі від 10 до 50 % коефіцієнт витрати палива зростає від 1,05 до 1,31. Нами також отримано залежності зміни ціни використаного товарного бензину у паливних сумішах в залежності від процентного вмісту в них біогазового пального. Для прийнятих цін на товарний бензин та біогаз з проведених досліджень випливає, що із збільшенням процентного вмісту біогазу в еквівалентному паливі до 50 % досягається зростання економічної ефективності його застосування завдяки використанню низькооктанового газу і в результаті вартість отриманого палива знижується від 5,8 % до 30 %. Отже, використання біогазу на двигунах внутрішнього згоряння є перспективним як з огляду на зниження ціни використовуваного в паливних сумішах бензину так і з розвитком технологій ГБО.

Ключові слова: відновлювані джерела, біогаз, паливо, економія, ефективність, використання, газобалонне обладнання

ВСТУП

Використання природного газу у сумішах з товарним бензином на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) викликає ряд труднощів, що пов'язані з адаптацією двигуна та його систем. Проте, сучасна система живлення ГБО 7-го покоління, що забезпечує подачу одночасно рідкої і газоподібної фази палива для двигунів з прямим упорскуванням і частково вирішує ці проблеми.

Перспектива використання біогазового палива має також істотну економічну та екологічну доцільність, а тому є надзвичайно важливою і може значно розширити сировинну базу для отримання палива та значно покращити екологічні показники ДВЗ.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) використовуються в різних областях для різних цілей. ДВЗ в основному працюють на вуглеводневих паливах.

Використання викопного палива як джерела енергії негативно впливає на навколишнє середовище [1].

Щоб зменшити використання викопного палива ДВЗ переводять на альтернативні види палива, такі як біогаз і біопаливо.

Біогаз є одним із найперспективніших палив для ДВЗ. Біогаз виробляється шляхом розщеплення органічних речовин за відсутності кисню, і цей біогаз, є відновлюваним джерелом енергії [2].

Хімічний склад сирого біогазу такий: метан (CH_4) становить 50-75 % суміші, вуглекислий газ коливається від 25 до 50 % (CO_2), водяна пара в діапазоні 5-6 % і азот в діапазоні 12-15 % [3].

Біогаз має багато переваг порівняно як з викопним паливом, так і з іншими видами палива, отриманими з біомаси. Технологія біогазу відіграє значну роль у отримання енергії з органічних матеріалів і принесення відходів матеріалів у ґрунт, а після їх утворення – відходи не зникають, а перетворюються на набагато більш цінну органіку добриво [4, 5].

Крім того, він має такі переваги, як легкість транспортування в трубопроводах, безпечне зберігання у вигляді стисненого газу в балонах високого тиску, не розбавляючи мастило, і менше шкідливих викидів вихлопних газів для навколишнього середовища.

Біогаз також зменшує можливість детонації через його високу температуру самозаймання [6, 7].

Для ефективного спалювання біогазу, умови, які повинні бути реалізовані в циліндрі, принаймні 50% від CH_4 , який є основним складником біогазу [8].

Біогаз можна використовувати на ДВЗ без необхідності серйозних структурних змін [9, 10].

Крім того, якщо потрібні структурні зміни, то можна модифікувати двигун з іскровим запалюванням для роботи на біогазі [11, 12].

Управління двигуном може здійснюватися шляхом зміни роботи системи подачі палива та моменту запалювання ДВЗ.

Біогаз можна більш ефективно використовувати в ДВЗ шляхом очищення горючих газів, що містяться в них [13, 14].

Hotta та ін. [15] виконали дослідження ЗВШ двигуна, щоб дослідити зручність використання біогазу в двигуні SI. У порівнянні з роботою на бензині показники зросли на 12%. Автори вказали, що в той час як CO і NO_x зменшилися на 40% і 81,5%, HC і CO_2 зросли на 6,8% і 40%. Крім того, вони заявили, що тиск у циліндрі, отриманий з утилізація біогазу менший, ніж для бензину, положення пікового тиску в циліндрі знаходиться на нижчому рівні і з'являється значно пізніше.

Крячунас та ін. [16] перевірили біогазові суміші, що містять 0%, 20%, 40% і 50% CO_2 за об'ємом у двигуні SI за двох окремих моментів запалювання. Як йдеться в результатах дослідження, вказано, що збільшення концентрації CO_2 та використання фіксованого моменту запалювання зменшує тиск у циліндрі та NO_x .

Біогаз містить (CH_4), який змінюється в залежності від очищення та сировини для його отримання [17]. Різний вміст (CH_4) у біогазі впливає на встановлення стехіометричних умов для виробництва [18], використання біогазу з низькою теплотою згоряння призведе до низької продуктивності двигуна.

На сьогодні, біогаз є одним із альтернативних джерел енергії, яке є екологічно чистим та відновлюваним [19].

Наявність виробництва біогазу в сільській місцевості може безпосередньо сприяти створенню малих електростанцій які підтримують сільськогосподарську, птахівницьку та рослинницьку діяльність [20].

Були проведені дослідницькі роботи (і застосування) біогазу як палива для двигунів, наприклад, для силових двигунів або транспортних засобів [21]. Результати експерименту дозволяють заощадити бензин на 20%.

Тим часом дослідження біогазу як другого палива [22] призвели до 10% скорочення використання бензинового палива.

Кілька інших дослідників також досягли успіху у використанні біогазу як заміни палива [23], [24], [25]).

Використовуючи біогаз як паливо з мінімальним вмістом CH_4 45% може працювати двигун циклу Отто, електрогенератор потужністю до 100 кВт [26].

Стверджується, що використання викопного палива сприяють глобальному потеплінню через властиві викиди вуглекислого газу [27]. Тому вживаються необхідні заходи для диверсифікації енергії для різних цілей.

Дослідження щодо використання біогазу як палива для двигуна циклу Отто є частиною цих дослідницьких робіт.

Отже, як бачимо з огляду літературних джерел питання використання біогазу на транспортних засобах є актуальним та малодослідженим.

Тому, наші дослідження будуть напрямлені на використання біогазу як палива для ДВЗ в суміші з товарним бензином.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки у сфері використання будь якого альтернативного виду палива суттєву роль відіграє економічна доцільність, то з огляду на викладене вище основною метою досліджень є обґрунтування економічної ефективності використання біогазового палива в суміші з товарним бензином у системі живлення ГБО 7-го покоління.

До основних задач дослідження відносяться:

- отримання коефіцієнта, що враховує збільшення витрати паливної суміші біогазового палива та товарного бензину;
- дослідження залежності ціни товарного бензину від його октанового числа;
- встановлення ефективності застосування еквівалентних палив на базі товарного бензину від вмісту в них біогазу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасна система ГБО сьомого покоління призначена для двигунів із прямим впорскуванням пального і може забезпечити подачу палива одночасно у двох станах: у рідкій фазі через бензинові форсунки безпосередньо в камеру згоряння та у паровій фазі – у впускний колектор двигуна. Саме ця особливість роботи системи ГБО сьомого покоління дає можливість одночасної подачі як рідкого палива (бензин) так і газоподібного палива (біогаз).

До одного з основного показника палива для бензинових двигунів, що суттєво впливає на його вартість відноситься октанове число (ОЧ).

Детонаційна стійкість бензинів оцінюється умовним показником – октановим числом, значення якого входить у марки бензину. Для його визначення вибирають еталонні палива, одне із яких володіє високою детонаційною стійкістю (має високу температуру займання). Це – ізооктан, і його октанове число умовно прийнято за 100. Друге еталонне паливо з низькою детонаційною стійкістю (має низьку температуру займання) – н-гептан і його октанове число умовно прийнято за 0.

На економічну ефективність застосування біогазу в ГБО сьомого покоління при його частковій подачі в ДВЗ з товарним бензином впливають фінансові витрати на паливо, тому, що інші витрати (на оливу, амортизаційні відрахування і т.д.), як під час роботи автомобіля на товарному бензині так і при комбінації бензину з біогазом, будуть практично однаковими.

Доцільність додавання біогазу до товарного бензину визначається за методикою [28], якщо:

$$Ц_{ТБ} \geq (Ц_{Б} \cdot q_{Б} + Ц_{БГ} \cdot q_{БГ}) \cdot k, \quad (1)$$

де $Ц_{ТБ}$ – роздрібна ціна товарного бензину, грн./л;

$Ц_{Б}$ – роздрібна ціна л бензину, що може використовуватися в паливних сумішах, грн./л;

$Ц_{БГ}$ – роздрібна ціна л біогазу, грн.;

$q_{Б}$ – об'ємна частка бензину в паливних сумішах, %;

$q_{БГ}$ – об'ємна частка біогазу в паливних сумішах, %;

k – коефіцієнт, який враховує збільшення витрати паливної суміші, і визначається з рівняння балансу теплоти, яка міститься в товарному бензині та паливних сумішах бензину і біогазу.

Нижчу теплоту згоряння паливних сумішей знаходимо за формулою:

$$h_{НПС} = h_{НБ} \cdot q_{Б} + h_{НБГ} \cdot q_{БГ}, \quad (2)$$

де $h_{НБГ}$ – нижча теплота згоряння біогазу палива, яка згідно досліджень складає $h_{НБГ} = 26,93$ МДж/м³;

$h_{НБ}$ – нижча теплота згоряння бензину, 44 МДж/кг або 33 МДж/л.

З урахуванням формули (2) отримуємо:

$$k = \frac{h_{НБ}}{h_{НБ} \cdot q_{Б} + h_{НБГ} \cdot q_{БГ}}. \quad (3)$$

Значення коефіцієнта k залежно від об'ємної частки біогазу в паливних сумішах наводимо в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта k в залежно від частки біогазу в паливних сумішах

$q_{БГ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
k	1,11	1,25	1,43	1,67	2,0

Для розрахунку економічної ефективності застосування біогазу на двигуні ауді А6 побудуємо графічну залежність зміни ціни товарного бензину від ОЧ. Виходячи з роздрібних цін на бензин на час проведення розрахунків, вартість одного л в залежності від ОЧ становила при ОЧ не менше 92 – 56,99 грн./л, при ОЧ не менше 95 – 58,69 грн./л, а за ОЧ не менше 98 – 60,99 грн./л, що показано графічно на рис. 1.

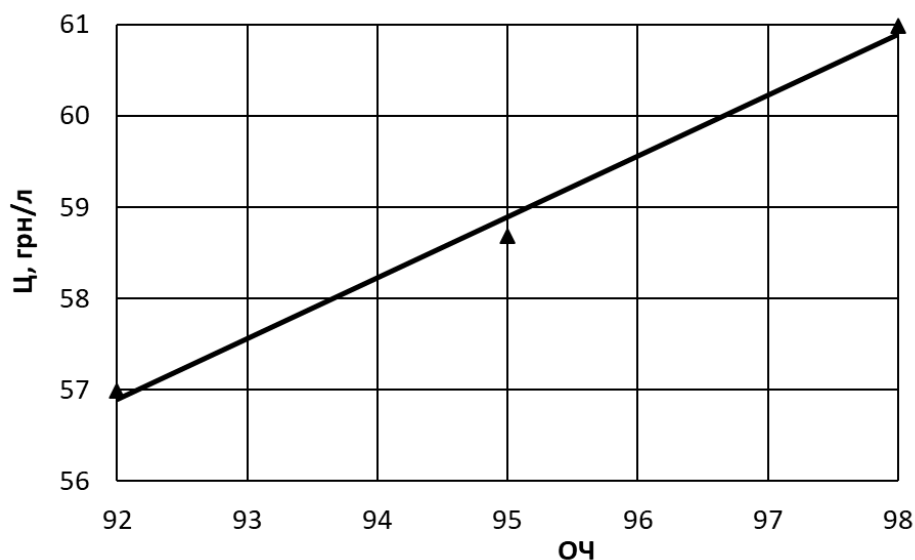


Рисунок 1 – Залежність зміни ціни товарного бензину в залежності від ОЧ

Зміну вартості бензину від ОЧ аналітично можна описати рівнянням:

$$Ц_{\text{БОЧ}} = 0,6667 \cdot \text{ОЧ}_Б + 4,4433, \quad (4)$$

де $\text{ОЧ}_Б$ – октанове число товарного бензину. При цьому коефіцієнт кореляції даної залежності рівний $R^2=0,99$.

Значення $\text{ОЧ}_Б$, необхідного для використання з біогазом розраховують за залежністю:

$$\text{ОЧ} = \text{ОЧ}_Б - \Delta \text{ОЧ}, \quad (5)$$

де $\Delta \text{ОЧ}$ – приріст октанового числа суміші бензину і біогазу, що визначається за процентним масовим вмістом біогазу в паливних сумішах.

Економічна ефективність застосування паливних сумішей оцінюється різницею цін л товарного бензину і відповідної за теплою згоряння кількості паливної суміші бензину і біогазу та визначається за залежністю:

$$\Delta E = Ц_Б - (Ц_{\text{БОЧ}} \cdot Q_Б + Ц_{\text{БГ}} \cdot Q_{\text{БГ}}) \cdot k. \quad (6)$$

В розрахунках прийнята вартість л біогазу – 0,00385 грн./л.

У розрахунку економічної ефективності застосування біогазу, в результаті добавки до товарних бензинів і спалювання на ДВЗ, необхідною умовою має бути забезпечення однакових ОЧ паливних сумішей у порівнянні з товарним бензином. За результатами дослідження, на рис. 2 показано графічну залежність зміни ОЧ бензину від процентного вмісту в ньому біогазу.

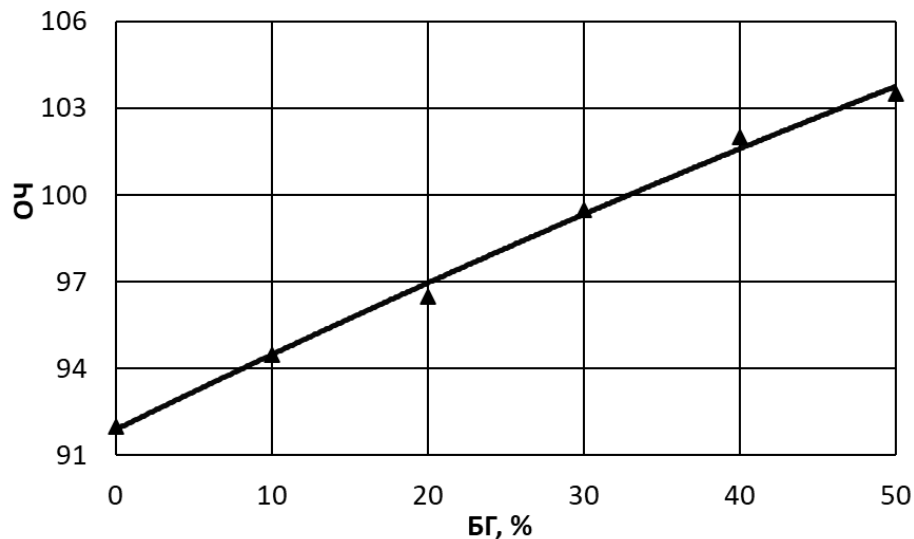


Рисунок 2 – Залежність зміни ОЧ товарного бензину від вмісту біогазу

Залежність рис. 2 описується аналітичним рівнянням (7).

$$\text{ОЧ} = -0,0005(\% \text{ БГ})^2 + 0,2639(\% \text{ БГ}) + 91,893. \quad (7)$$

Коефіцієнт кореляції приведенного рівняння рівний $R^2=0,99$.

Залежність приросту $\Delta\text{ОЧ}$ бензину (визначеного з рис. 2) від процентного вмісту в ньому біогазу зображена на рис. 3.

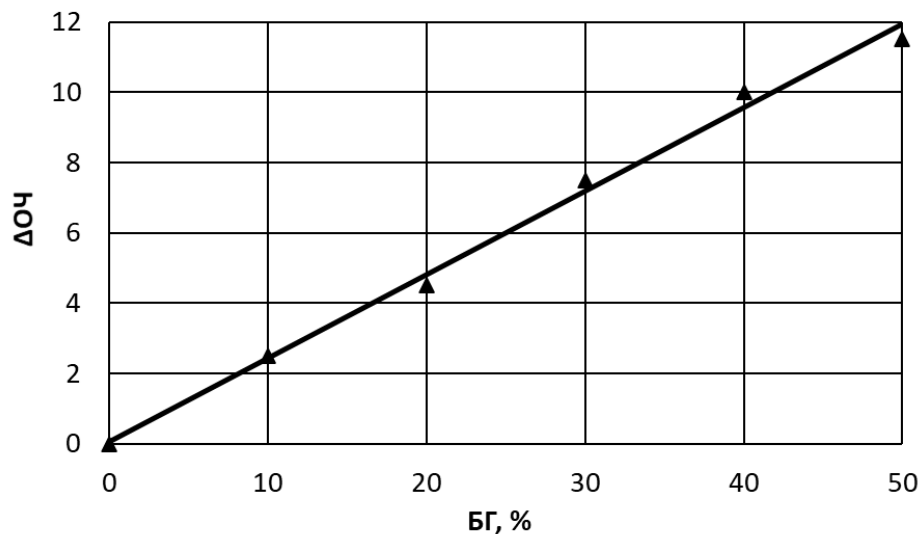


Рисунок 3 – Графік залежності приросту ОЧ паливних сумішей від вмісту в них біогазу

Аналітично залежність рис. 3 описується поліномом наступного виду:

$$\Delta\text{ОЧ} = 0,2371(\% \text{ БГ}) + 0,0714. \quad (8)$$

Коефіцієнт кореляції приведенного рівняння рівний $R^2=0,99$.

Як видно з рис. 1, із зменшенням ОЧ бензину роздрібна ціна його зменшується, для досягнення економічної ефективності використання паливних сумішей бензину і біогазу, спочатку з рівняння (8) визначають зміну $\Delta\text{ОЧ}$ в залежності від вмісту біогазу в паливних сумішах, а далі з рівняння (7) – октанове число бензину, що доцільно використовувати в паливних сумішах.

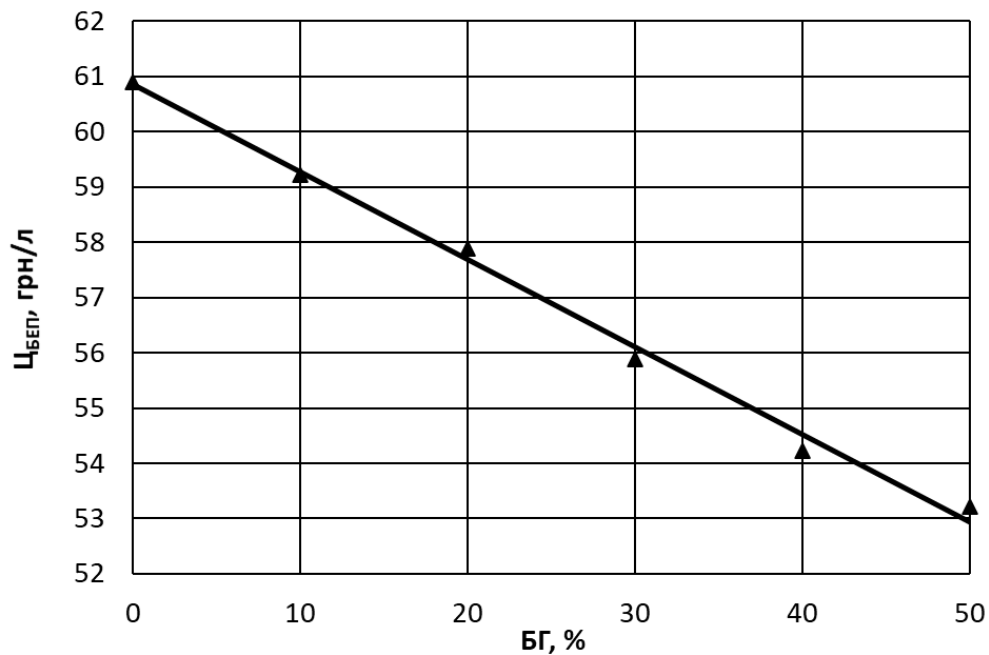


Рисунок 4 – Залежність зміни ціни бензину використаного в паливних сумішах від вмісту в них біогазу

Отже з рівняння (4) – одержуємо ціну бензину, що використовується в паливних сумішах. Залежності (рис. 4) описується відповідно наступним аналітичним рівнянням:

$$Ц_{БЕП} = -0,1581(\% \text{ БГ}) + 60,846. \quad (9)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння (9) рівний $R^2=0,99$.

Для оцінки економічної ефективності використання паливних сумішей бензину і біогазу, були розраховані залежності зміни ціни використаного бензину згідно методики [28] в залежності від вмісту біогазу (рис. 5).

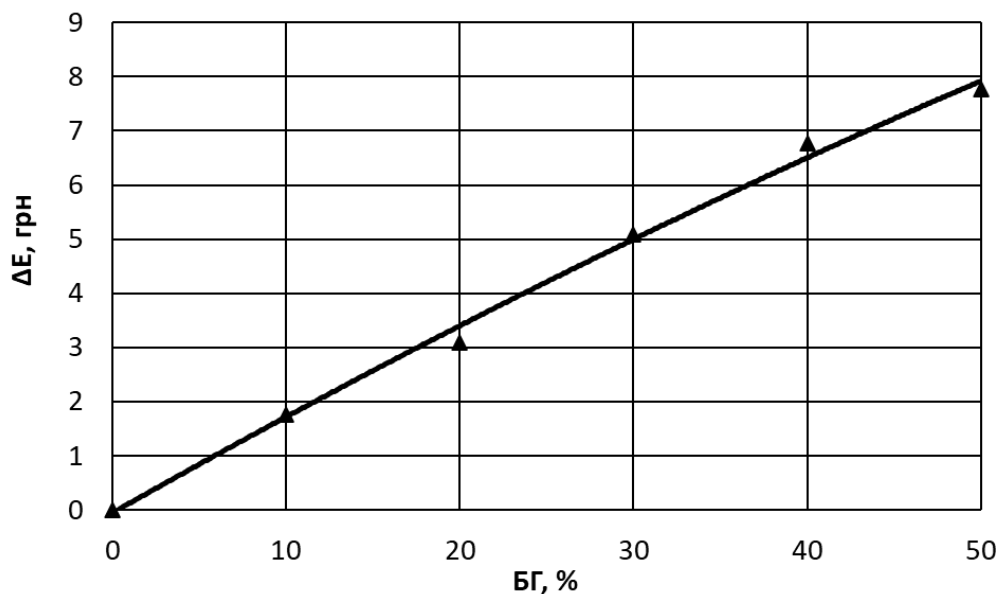


Рисунок 5 – Залежність ефективності застосування еквівалентних палив на базі товарного бензину від вмісту в них біогазу

Застосування різних паливних сумішей забезпечується додавкою до бензину різної кількості біогазу, а тому економічна ефективність застосування різних паливних сумішей буде різною. При

кожній добавці біогазу до палива було проведено розрахунок економічної ефективності, за даними розрахунку побудовано графічні залежності її зміни від процентного вмісту в паливних сумішах біогазу (рис. 5).

Одержана графічна залежність економічної ефективності використання біогазу в еквівалентному паливі описуються наступним рівнянням:

$$\Delta E = -0,0004(\%БГ)^2 + 0,1817(\%БГ) - 0,0541 \quad (10)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння (10) рівний $R^2=0,99$.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз економічної ефективності показав, що використання біогазового палива в системах ГБО 7-го покоління дозволяє знизити собівартість експлуатації автомобіля на 13,5 %. Це зумовлено нижчою ринковою вартістю біогазу порівняно з нафтовим паливом, його високим октановим числом та високою точністю дозування паливної суміші, що характерно для систем 7-го покоління.

Попри високу початкову вартість ГБО 7-го покоління дозволяє уникнути втрат потужності (на відміну від ГБО 4), відсутність необхідності в окремому випарнику знижує витрати на обслуговування, а високе октанове число біогазу оптимізує роботу двигуна на суміші з бензином.

Додаткова економічна вигода формується за рахунок екологічної складової – використання біогазу мінімізує викиди CO_2 , що в умовах впровадження вуглецевого податку робить підприємство більш рентабельним.

Однак масовому впровадженню технології використання добавок біогазу до товарного бензину може завадити ряд факторів:

- недостатня мережа біогазових заправок;
- нестабільність хімічного складу біогазу (необхідність очищення до стану біометану);
- високі вимоги до якості товарного бензину, що використовується як допоміжне паливо.

ВИСНОВКИ

Отже, для прийнятих цін на бензин і біогаз та виходячи з проведених розрахунків впливає, що із збільшенням вмісту біогазу в системі живлення бензином і біогазом досягається збільшення економічної ефективності їх застосування за рахунок використання бензину з низьким ОЧ.

При застосуванні біогазу разом з бензином, що має низьке ОЧ в кількості до 50% можна досягнути зниження вартості бензину на кожному л до 7,5 грн.

Такий ефект, при використанні біогазу разом із бензинами вказує на перспективність даного напрямку використання біогазового пального та доцільність подальшого дослідження даного напрямку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.J. Gelegenis et al. Optimization of biogas production by codigesting whey with diluted poultry manure, *Renewable Energy*, (2007), P. 35-38.
- 2.V. Katinas et al. Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2019), P. 121-135/
- 3.P.K. Nutakki et al. Mulugundam Sivasurya. "Effect Of n-Amyl Alco-hol/Biodiesel Blended Nano Additives on the Performance, Combustion and Emis-sion Characteristics of CRDI Diesel Engine", *Research Square*, (2021), P. 45-54.
- 4.Diamantis V., Eftaxias A., Stamatelatou K., Noutsopoulos C., Vlachokostas C., Aivasidis A. (2021) Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes, *Renew. Energy* 168, 438–447.
- 5.Tallou A., Salcedo F.P., Haouas A., Jamali M.Y., Atif K., Aziz F., Amir S. (2020) Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung, *Environ. Technol. Innov.* 20, 101152.
- 6.Tippayawong N., Thanompongchart P. (2010) Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO_2 and H_2S in a packed column reactor, *Energy* 35, 12, 4531–4535.
- 7.Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B. (2013) Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy Conv. Manage.* 76, 463–471.
- 8.Simsek S., Uslu S. (2020) Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine, *Fuel* 279, 118528.

- 9.Jung C., Park J., Song S. (2015) Performance and NO_x emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy* 86, 186–195.
- 10.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K., Kulkarni V. (2020) Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine, *Renew. Energy* 150, 854–867.
- 11.Kalsi S.S., Subramanian K.A. (2017) Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine, *Renew. Energy* 106, 78–90.
- 12.Nadaleti W.C., Przybyla G. (2018) Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries, *Energy* 154, 38–51.
- 13.Verma S., Das L.M., Kaushik S.C. (2017) Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis, *Energy Conv. Manage.* 138, 346–359.
- 14.Sadiq R., Iyer R.C. (2020) Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine, *Renew. Energy* 146, 997–1009.
- 15.Feroskhan M., Ismail S. (2017) A review on the purification and use of biogas in compression ignition engines, *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 14, 3, 4383–4400.
- 16.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K. (2019) Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas, *Renew. Energy* 134, 1307–1319.
- 17.Asmaranto R, Widhiyanuriyawan D and Sugiharto 2015 Pengembangan Teknologi Biogas Pedesaan untuk mengurangi Kerusakan Hutan dan Pencemaran Sumber Air (Malang: Universitas Brawijaya).
- 18.Mitzlaff KV 1988 Engines for biogas Theory, Modification, Economic Op-eration (Africa: A publ. of Dt. Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate in: Dt. Ges. für Techn. ZusammenarbeitGtz GmbH).
- 19.Venkata Ramesh Mamilla, Gopinath V, Subba Rao CV and Rao Lakshmi Narayana G 2011, Performance And Emission Characteristics of 4 Stroke Petrol En-gine Fueled With Biogas/LPG Blends *Int. J. of Adv. Eng. Technol.* vol 2 (1) pp 209-213.
- 20.Ehsan MD and Naznin N 2005 Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small Scale Power Generation *J. of Energi & Environment* vol 4 pp 1-9
- 21.Bui Van Ga 2002 LPG Fueling System for Automobiles Daihatsu 1.6 to Match Urban Transport Conditions in Vietnam *Int. Conf. Automotive Technol. (Ha-noi: VSAE-ICAT)*.
- 22.Albela H Pundkar, S M Lawankar and Sameer Deshmukh 2012 Perfor-mance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review *Int. J. of Sci. & Eng. Research* vol 3 (3), pp 1-7.
- 23.Kumar Mohan and Azad 2014 An Experimental Investigation of Perfor-mance and Emissions of LPG as Dual Fuel in Diesel Engine Generator *Int. J. of Eng. Research and Appl.* vol 4 (11), pp 41-53.
- 24.Rosli Abu Bakar 2002 Design and Development of a New CNG (Com-pressed Natural Gas) Engine, (Malaysia: Pusat Pengurusan Penyelidikan Universiti Teknologi).
- 25.Awogbemi, Omojola, Adeyemo and S Babatunde 2015 Development And Testing Of BiogasPetrol Blend as an Alternative Fuel For Spark Ignition Engine *Int. J. of Sci. & Technol. Research* vol 4 (9) pp 179-185.
- 26.Theodorita AS, Dominik R, Heinz P, Tobias F, Silke V and Rainer J 2008 Biogas Handbook, (Denmark: University of Southern Denmark BiG East Project Es-bjerg).
- 27.Sara MC A, Jyh Y Chen and Fernand A Carlos 2011 Mechanical of Com-bustion Processes (DOI: 10.1007/978-1-4419-7943-8).
- 28.Гутаревич Ю.Ф., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мороз О.Г. Оцінка ефективності додавання спиртових сполук до бензину. Автошляхових України. - 2004. - № 3. - С. 17-19.

REFERENCES

- 1.J. Gelegenis et al. Optimization of biogas production by codigesting whey with diluted poultry manure, *Renewable Energy*, (2007), P. 35-38.
- 2.V. Katinas et al. Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2019), P. 121-135/

- 3.P.K. Nutakki et al. Mulugundam Sivasurya. "Effect Of n-Amyl Alco-hol/Biodiesel Blended Nano Additives on the Performance, Combustion and Emis-sion Characteristics of CRDI Diesel Engine", Research Square, (2021), P. 45-54.
- 4.Diamantis V., Eftaxias A., Stamatelatou K., Noutsopoulos C., Vlachokostas C., Aivasidis A. (2021) Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes, *Renew. Energy* 168, 438–447.
- 5.Tallou A., Salcedo F.P., Haouas A., Jamali M.Y., Atif K., Aziz F., Amir S. (2020) Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung, *Environ. Technol. Innov.* 20, 101152.
- 6.Tippayawong N., Thanompongchart P. (2010) Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor, *Energy* 35, 12, 4531–4535.
- 7.Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B. (2013) Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy Conv. Manage.* 76, 463–471.
- 8.Simsek S., Uslu S. (2020) Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine, *Fuel* 279, 118528.
- 9.Jung C., Park J., Song S. (2015) Performance and NO_x emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy* 86, 186–195.
- 10.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K., Kulkarni V. (2020) Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine, *Renew. Energy* 150, 854–867.
- 11.Kalsi S.S., Subramanian K.A. (2017) Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine, *Renew. Energy* 106, 78–90.
- 12.Nadaleti W.C., Przybyla G. (2018) Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries, *Energy* 154, 38–51.
- 13.Verma S., Das L.M., Kaushik S.C. (2017) Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis, *Energy Conv. Manage.* 138, 346–359.
- 14.Sadiq R., Iyer R.C. (2020) Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine, *Renew. Energy* 146, 997–1009.
- 15.Feroskhan M., Ismail S. (2017) A review on the purification and use of biogas in compression ignition engines, *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 14, 3, 4383–4400.
- 16.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K. (2019) Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas, *Renew. Energy* 134, 1307–1319.
- 17.Asmaranto R, Widhiyanuriyawan D and Sugiharto 2015 Pengembangan Teknologi Biogas Pedesaan untuk mengurangi Kerusakan Hutan dan Pencemaran Sumber Air (Malang: Universitas Brawijaya).
- 18.Mitzlaff KV 1988 Engines for biogas Theory, Modification, Economic Op-eration (Africa: A publ. of Dt. Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate in: Dt. Ges. für Techn. ZusammenarbeitGtz GmbH).
- 19.Venkata Ramesh Mamilla, Gopinath V, Subba Rao CV and Rao Lakshmi Narayana G 2011, Performance And Emission Characteristics of 4 Stroke Petrol En-gine Fueled With Biogas/LPG Blends *Int. J. of Adv. Eng. Technol.* vol 2 (1) pp 209-213.
- 20.Ehsan MD and Naznin N 2005 Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small Scale Power Generation *J. of Energi & Environment* vol 4 pp 1-9
- 21.Bui Van Ga 2002 LPG Fueling System for Automobiles Daihatsu 1.6 to Match Urban Transport Conditions in Vietnam *Int. Conf. Automotive Technol.* (Ha-noi: VSAE-ICAT).
- 22.Albela H Pundkar, S M Lawankar and Sameer Deshmukh 2012 Perfor-mance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review *Int. J. of Sci. & Eng. Research* vol 3 (3), pp 1-7.
- 23.Kumar Mohan and Azad 2014 An Experimental Investigation of Perfor-mance and Emissions of LPG as Dual Fuel in Diesel Engine Generator *Int. J. of Eng. Research and Appl.* vol 4 (11), pp 41-53.
- 24.Rosli Abu Bakar 2002 Design and Development of a New CNG (Com-pressed Natural Gas) Engine, (Malaysia: Pusat Pengurusan Penyelidikan Universiti Teknologi).

25. Awogbemi, Omojola, Adeyemo and S Babatunde 2015 Development And Testing Of BiogasPetrol Blend as an Alternative Fuel For Spark Ignition Engine Int. J. of Sci. & Technol. Research vol 4 (9) pp 179-185.

26. Theodorita AS, Dominik R, Heinz P, Tobias F, Silke V and Rainer J 2008 Biogas Handbook, (Denmark: University of Southern Denmark BiG East Project Es-bjerg).

27. Sara MC A, Jyh Y Chen and Fernand A Carlos 2011 Mechanical of Com-bustion Processes (DOI: 10.1007/978-1-4419-7943-8).

28. Hutarevych Yu.F., Hovorun A.H., Korpach A.O., Moroz O.H. Otsinka efektyvnosti dodavannia spyrtovykh spoluk do benzynu. Avtoshliakhovykh Ukrainy. - 2004. - № 3. - S. 17-19.

V. Melnyk, F.Kozak. Research on the economic efficiency of using biogas fuel with commodity gasoline in the 7th generation hbo power supply system.

The authors have conducted a study of the economic efficiency of using biogas fuel in a mixture with commercial gasoline. In the process of using natural gas in internal combustion engines, a number of difficulties arise related to the adaptation of the engine and its systems. However, the prospect of using biogas fuel has significant economic and environmental feasibility, and therefore is extremely important. Until recently, it was extremely difficult to ensure the simultaneous supply of liquid and gaseous phases of fuel, but the 7th generation gas cylinder equipment (GCB) for direct injection engines provides fuel supply simultaneously in the liquid phase (through gasoline injectors) and the vapor phase (into the intake manifold). Therefore, the study of the economic efficiency of using biogas fuel with commercial gasoline in the 7th generation GCB power supply system is quite relevant. At the initial stage, we obtained a coefficient that takes into account the increase in fuel mixture consumption due to the lower calorific value of biogas. With an increase in the share of biogas in fuel from 10 to 50%, the fuel consumption coefficient increases from 1.05 to 1.31. We also obtained the dependence of the change in the price of used commercial gasoline in fuel mixtures depending on the percentage content of biogas fuel in them. For the adopted prices for commercial gasoline and biogas, the conducted studies show that with an increase in the percentage content of biogas in equivalent fuel to 50%, an increase in the economic efficiency of its use is achieved due to the use of low-octane gas and, as a result, the cost of the resulting fuel decreases from 5.8% to 30%. Therefore, the use of biogas in internal combustion engines is promising both in view of the reduction in the price of gasoline used in fuel mixtures and with the development of HBO technologies.

Keywords: renewable sources, biogas, fuel, economy, efficiency, use, gas cylinder equipment

МЕЛЬНИК Василь Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу e-mail: vasjamel@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>

КОЗАК Федір Васильович, кандидат технічних наук, професор кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу e-mail: fkozak@nung.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0009-9396-9147>

MELNYK Vasyl, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

e-mail: vasjamel@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>

KOZAK Fedir. Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

e-mail: fkozak@nung.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0009-9396-9147>

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/qx7gdh81>

Мельнікова Ю.І.^{1,2}, Орда О. О.²*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна¹,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна²*

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ПАРАМЕТРИЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗКЛАДІВ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Робота присвячена дослідженню проблеми ефективності практичної реалізації генетичних алгоритмів (ГА) для синхронізації розкладів руху залежно від вибору евристичних параметрів.

Метою дослідження є систематичне узагальнення сучасних наукових підходів до обґрунтування параметричного налаштування ГА при синхронізації розкладів руху громадського транспорту та виявлення особливостей їх вибору при проведенні наукових досліджень з підвищення ефективності та надійності рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. У роботі використано методи системного та порівняльного аналізу результатів сучасних наукових праць, присвячених використанню ГА у задачах оптимізації транспортних розкладів.

У роботі виділено ключові параметри налаштування генетичного алгоритму, що формують архітектуру обчислювального процесу, до яких відносяться: розмір популяції, ймовірність кросингверу та ймовірність мутації. Встановлено, що у більшості проаналізованих сучасних наукових праць ці параметри визначаються емпірично без належного теоретичного обґрунтування, що свідчить про необхідність розробки методичних підходів до їх вибору. Критичний аналіз існуючих розробок дозволив виявити, що науковцями недостатньо уваги приділяється саме евристичному вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху громадського. Це обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Визначено перспективний напрям подальших досліджень, що полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

Практична значимість дослідження полягає у систематизованому аналітичному узагальненні існуючих підходів, що дозволить науковцям та фахівцям транспортної галузі використовувати результати дослідження в якості інструментарію для обґрунтування параметричного налаштування ГА з метою підвищення ефективності їх застосування при вирішенні задач синхронізації розкладів руху громадського транспорту.

Ключові слова: громадський транспорт, синхронізація розкладів руху, генетичний алгоритм, параметри налаштування, систематичний аналіз.

ВСТУП

Синхронізація розкладів руху громадського транспорту (ГТ) є одним із основних напрямів підвищення якості транспортних послуг. Синхронізація графіків руху ліній громадського транспорту призводить до значного скорочення часу очікування пасажирами. Окрім підвищення якості послуг, синхронізація розкладів призводить до покращення показників функціонування транспортних засобів.

Задача синхронізації розкладів руху є *NP*-складною, тому на практиці визначення її оптимального розв'язання в умовах функціонування реальних систем пасажирського транспорту є неосяжним. Ефективним інструментом для вирішення задачі, яка характеризується величезним простором пошуку, є генетичний алгоритм. Його широка імплементація в різних галузях науково-практичної діяльності підтверджує високу обчислювальну ефективність та адаптивність до варіативних умов.

Попри значний потенціал ГА в синхронізації розкладів руху громадського транспорту, ефективність методу залежить від правильного вибору евристичних параметрів. Параметри ГА значно впливають на швидкість збіжності алгоритму та якість рішення. Неоптимальний вибір цих параметрів може призвести до передчасної конвергенції, неможливості знайти наближені до оптимальних рішення або надмірно тривалого часу обчислення, що зменшує практичну корисність синхронізації розкладів з використанням ГА. Тому робота присвячена дослідженню проблеми ефективності практичної реалізації ГА для синхронізації розкладів руху залежно від вибору евристичних параметрів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результати аналізу наукових джерел [1-23] свідчать, що ГА є вискоелективним інструментарієм оптимізації та синхронізації розкладів руху громадського транспорту. Протягом останніх десятиліть спостерігається суттєве зростання кількості досліджень, присвячених

застосуванню ГА для вирішення цієї задачі. Результати досліджень доводять здатність ГА отримувати рішення високої якості для різноманітних топологій мереж та варіативних цільових функцій. Попри те, що ГА не гарантують досягнення абсолютно оптимального рішення у кожній ітерації, вони демонструють значну перевагу у швидкості збіжності та меншу обчислювальну складність порівняно з традиційними методами оптимізації, що робить їх перспективним інструментом для вирішення задач транспортного планування.

Водночас аналіз останніх досліджень показав, що питання ефективності застосування евристичних методів при формуванні розкладів руху громадського транспорту залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим актуальною постає задача проведення критичного аналізу сучасних наукових праць та систематизації і узагальнення підходів до параметричного налаштування ГА, що дозволить виявити наукові проблеми та перспективні напрями застосування метаевристичних методів при вирішенні задач транспортного планування.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є систематичне узагальнення сучасних наукових підходів до обґрунтування параметричного налаштування ГА при синхронізації розкладів руху громадського транспорту та виявлення особливостей їх вибору при проведенні наукових досліджень з підвищення ефективності та надійності рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати та систематизувати існуючі наукові підходи до вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху громадського транспорту.

2. Визначити ключові параметри налаштування ГА, що формують архітектуру обчислювального процесу;

3. Висвітлити проблемні аспекти процедури налаштування параметрів ГА при вирішенні поставленої задачі.

У дослідженні використано методи системного та порівняльного аналізу результатів сучасних наукових праць, присвячених використанню ГА у задачах оптимізації транспортних розкладів. Для визначення ключових параметрів налаштування алгоритмів та виявлення особливостей їх вибору з метою підвищення ефективності та надійності рішень використано методи теоретичного узагальнення та систематизації існуючих наукових розробок.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у систематичному узагальненні сучасних наукових підходів до параметричного налаштування ГА для оптимізації розкладів руху громадського транспорту та виявленні наукової проблеми, обумовленої домінуванням емпіричного вибору ключових параметрів над теоретично обґрунтованими методиками, що обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж. Отримані результати розширюють теоретико-методологічні засади застосування метаевристичних методів у задачах транспортного планування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі проведеного аналізу останніх досліджень [1–23] систематизовано базову архітектуру та послідовність етапів реалізації ГА, що дозволило встановити взаємозв'язок між етапами реалізації ГА та його параметричним налаштуванням. Генетичний алгоритм починається з випадкової генерації початкової популяції індивідумів, кожна з яких закодована як хромосома. Після обчислення значень цільової функції для кожної особи поточної популяції здійснюється процедура селекції батьківських пар. Відбір особин для подальшого кросинговеру реалізується на основі їхніх показників адаптивності, що забезпечує пріоритетне відтворення найбільш пристосованих рішень відповідно до встановлених критеріїв оптимізації. Кросинговер шляхом обміну частинами батьків в обраній точці створює нове потомство. Мутація передбачає зміну одного або декількох «генів» у випадковому порядку, щоб створити нове потомство, таким чином створюючи нові адаптивні рішення, які дозволяють уникнути локальних оптимумів. Завершення ГА відбувається за однієї з умов: досягнуто фіксованої кількості поколінь; рівень пристосованості досягнуто; відсутність поліпшення найкращого значення пристосованості.

Параметри ГА інтегровані в кожен етап його реалізації і визначають траєкторію пошуку та швидкість збіжності алгоритму до глобального екстремуму. До таких параметрів ГА відносяться:

1. Довжина хромосоми.
2. Кількість поколінь.
3. Розмір популяції.
4. Коефіцієнт виживання.

5.Ймовірність кросинговеру.

6.Ймовірність мутації і кількість мутацій.

Кожний параметр ГА має особливий і різний вплив на якість рішення поставленої задачі. Науковці і фахівці в основному визначають параметри ГА інтуїтивно або на основі особистого досвіду.

Довжина хромосоми в структурі ГА визначається кількістю незалежних змінних оптимізаційної задачі. У контексті синхронізації розкладів цей параметр еквівалентний загальній кількості контрольних точок, параметри яких підлягають корекції. У роботі [21] розмір хромосоми становить 35 бітів: для п'яти маршрутів автобусного транспорту використано по 7 бітів на кожен маршрут. Значення часового зсуву може змінюватися в межах від 0 до 127 хв.

Кількість поколінь визначає тривалість ітераційного циклу і глибину опрацювання простору альтернатив. За допомогою цього параметра досягається баланс між тривалістю пошуку та прецизійністю результату. Особливу роль кількість поколінь відіграє у випадках, коли умовою завершення ГА є досягнення фіксованої кількості поколінь, в інших випадках цей параметр не використовується. Комплексний огляд літератури [1-21] це підтверджує. Більшість науковців (рис. 1) в своїх роботах не вказує даний параметр ГА, але найчастіше (23,5 % робіт) використовується значення кількості поколінь до 50 через значне збільшення часу обчислення при вирішенні проблеми синхронізації розкладу руху.

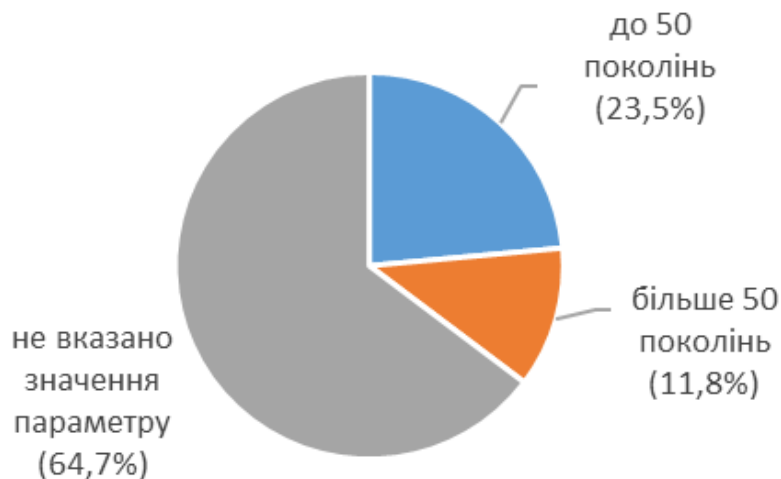


Рисунок 1 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру кількості поколінь, які використовуються для синхронізації розкладів руху ГТ

При визначенні розміру популяції необхідно врахувати, що у випадках, коли розмір популяції невеликий, доступний простір пошуку є обмеженим, а при великому значенні обчислювальне навантаження стає високим. Автори Nesmachnow S. та Risso C. [15] при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху автобусів з урахуванням розширених пересадочних зон використовували розмір популяції 25 особин. Значення цього параметру було прийнято на основі експериментів, які проводилися на п'яти невеликих прикладах завдань із різними характеристиками.

За результатами узагальнення підходів, представлених на рис. 2, у більшості досліджень [1, 5, 6, 10, 16, 21] автори використовують розмір популяції 50...100 особин (38,2 %). В останні роки спостерігається тенденція до збільшення значення цього параметра: у низці робіт розмір популяції становить 200 особин [12, 17, 19, 20]. Необхідно відзначити, що між кількістю поколінь і розміром популяції існує зворотна залежність. Велика популяція швидше покриває простір пошуку, що може скоротити кількість необхідних поколінь, тоді як мала популяція потребує тривалішої еволюції для досягнення певного рівня якості результатів застосування ГА.

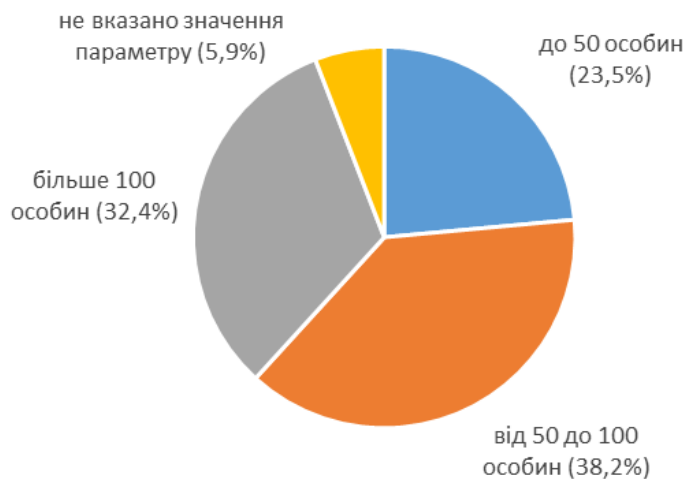


Рисунок 2 - Розподіл наукових публікацій за розміром популяції ГА, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Коефіцієнт виживання забезпечує стабільність еволюційного процесу і задіяний при відборі особин, які переходять у наступне покоління без генетичних змін. Значне збільшення коефіцієнту виживання може призвести до швидкого домінування однієї особини. У більшості проаналізованих робіт (66,7 %) цей параметр не вказується, так як його стандартне значення коливається в межах від 10 до 20 %.

Ймовірність кросинговеру визначає інтенсивність структурної рекомбінації генетичного матеріалу, виступаючи основним механізмом експлуатації простору пошуку. При вирішенні задачі синхронізації розкладів руху ймовірність кросинговеру часто встановлюється в межах від 50 % до 100 % (рис. 3). Автори [1, 3, 7, 20] вважають, що діапазон 50...60 % дозволяє забезпечити баланс між обчислювальною складністю і досягненням цільової достовірності результатів. Необхідно відзначити, що в останні роки ймовірність кросинговеру складає 90 % [10, 17, 18, 19]. З одного боку, це сприяє динамічному дослідженню простору пошуку, а з іншого – підвищує ймовірність втрати результатів пошуку наближених до оптимальних рішень.

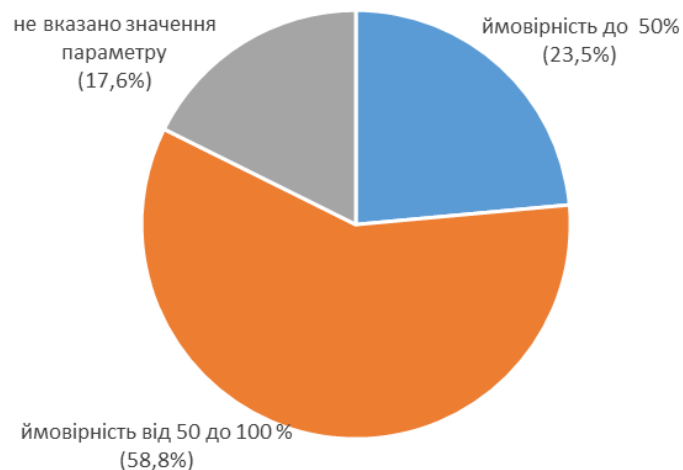


Рисунок 3 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру ймовірність кросинговеру, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Процес мутації запобігає збігу ГА до локального оптимуму і забезпечує генетичне різноманіття. Кількість мутацій і ймовірність мутації виступають стохастичними регуляторами варіативності генотипів, забезпечуючи інваріантність алгоритму. За результатами аналізу (на рис. 4) встановлено, що у задачах синхронізації розкладів руху ймовірність мутації найчастіше не перевищує 10 %. Таке значення параметра забезпечує баланс між дослідженням нових областей простору пошуку та використанням вже знайдених ефективних рішень. Cheng G. та He Y. [19] провели аналіз чутливості параметра ймовірності мутації при фіксованій ймовірності кросинговеру 90 %, на основі

якого було обрано значення ймовірності мутації 5 %. Автори зазначають, що таке значення параметра забезпечує компроміс між витратами часу та ефективністю пошуку рішень. Обмеженням проведеного аналізу є вузький діапазон дослідження ймовірності мутації (4...7 %).



Рисунок 4 - Розподіл наукових публікацій за значенням параметру ймовірності мутації, що використовується для синхронізації розкладів руху ГТ

Ефективна конфігурація ГА передбачає високе значення ймовірності кросинговеру і низьке значення ймовірності мутації, що забезпечує стабільну інтенсифікацію пошуку в поєднанні з достатньою генетичною гетерогенністю. У задачах синхронізації розкладів з великою кількістю контрольних точок асиметричне співвідношення цих параметрів забезпечує «прорив» крізь зони локальної збіжності. В роботі [20] для визначення оптимальних значень параметрів ГА, ймовірність кросинговеру (90 %), ймовірність мутації (10 %), використовували відносне відхилення (RPD) методу Тагучі. В межах дослідження проведено лише 9 експериментів для кожного тестового завдання. Необхідно відзначити, що саме така комбінація параметрів є найпоширенішою при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху [15, 18, 20].

Отже, параметри налаштування ГА визначають функціональну спроможність алгоритму та адекватність отриманих результатів при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху. У всіх проаналізованих роботах [1-21] відсутній теоретичний базис наукового обґрунтування параметричного налаштування ГА, що впливає на ефективність розв'язання задачі синхронізації розкладів руху. Існують окремі спроби обґрунтування вибору співвідношень ймовірності мутації та ймовірності кросинговеру [15, 20], однак проведені експерименти мають обмежену вибірку та спрощені тестові сценарії, що свідчить про те, що вибір параметрів ГА здебільшого базується на особистому досвіді або результатах попередніх досліджень.

Водночас ефективність роботи генетичного алгоритму значною мірою визначається значеннями його основних параметрів. Найбільший вплив на ефективність ГА мають такі параметри: розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації. Кожний з цих параметрів впливає на певний етап реалізації ГА, а їх комбінація формує архітектуру обчислювального процесу.

Проблема налаштування параметрів генетичного алгоритму під час розв'язання задач синхронізації розкладів руху залишається недостатньо дослідженою. Характер впливу параметрів ГА на його результативність значною мірою залежить від специфіки поставленої задачі. У зв'язку з цим визначення ефективних значень параметрів для задач синхронізації розкладів руху потребує проведення відповідних експериментальних досліджень.

В роботі [22] запропоновано застосування байєсівської оптимізації для автоматизованого налаштування параметрів ГА, що є критичним для підвищення ефективності методів оптимізації розкладів. Автори систематизують процес як мета-задачу, пропонуючи двоступеневу модель, яка ефективно замінює евристичний підбір параметрів та підвищує ефективність розв'язання складних комбінаторних задач у транспортних системах.

В роботі [23] був проведений експеримент з виявлення залежності результатів ГА (середній час очікування пасажирів) від параметрів ГА (розмір популяції, ймовірність кросинговеру та ймовірність мутації). У рамках дослідження застосовано інструментарій статистичного аналізу та методи лінійної регресії. Було сформовано три лінійні моделі, кожна з яких описує залежність

результативності генетичного алгоритму від зміни значення відповідного параметра. Отримані коефіцієнти регресії відображають емпіричну залежність середнього часу очікування пасажирів від зазначених параметрів ГА. Аналіз результатів експерименту свідчить про те, що на продуктивність ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху позитивно впливають лише розмір популяції та ймовірність кросингверу. Збільшення цих параметрів призвело до зменшення часу очікування пасажирів. Водночас параметри мутації (її ймовірність та кількість спроб) суттєво не змінили ефективність алгоритму в межах цієї задачі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що ГА активно застосовуються для вирішення задач оптимізації та синхронізації розкладів руху громадського транспорту. Водночас у більшості досліджень параметри генетичного алгоритму, такі як розмір популяції, ймовірність кросингверу та ймовірність мутації, визначаються емпірично або на основі інтуїтивних припущень дослідників.

Проведений аналіз показав, що у науковій літературі майже відсутні систематизовані підходи або методики обґрунтування вибору параметрів ГА для задач синхронізації транспортних розкладів. Це ускладнює практичне використання ГА у задачах транспортного планування та знижує ефективність їх застосування, що свідчить про наявність наукової проблеми та визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі. Перспективний напрям подальших досліджень полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень отримані наступні висновки:

1. Систематизовано результати сучасних наукових розробок щодо впливу параметричного налаштування генетичного алгоритму на його функціональну спроможність та релевантність результатів при вирішенні проблеми синхронізації розкладів руху.
2. Виділено ключові параметри налаштування генетичного алгоритму, що формують архітектуру обчислювального процесу, до яких відносяться: розмір популяції, ймовірність кросингверу та ймовірність мутації.
3. Встановлено, що у більшості проаналізованих сучасних наукових праць ці параметри визначаються емпірично без належного теоретичного обґрунтування, що свідчить про необхідність розробки методичних підходів до їх вибору.
4. Критичний аналіз існуючих розробок дозволив виявити, що науковцями недостатньо уваги приділяється саме евристичному вибору параметрів ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху ГТ. Це обмежує надійність алгоритмічних рішень у варіативних умовах функціонування транспортних мереж.
5. Визначено перспективний напрям подальших досліджень, що полягає у розробці адаптивних стратегій налаштування параметрів генетичного алгоритму для підвищення ефективності та надійності рішень відповідно до реальних умов функціонування громадського транспорту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Cevallos F., Zhao F. Minimizing transfer times in public transit network with genetic algorithm. *Transportation Research Record*. 2006. № 1971(1), 74–79. <https://doi.org/10.1177/0361198106197100109>
- 2.Shrivastava P, O'Mahony M. A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules? A genetic algorithms approach, *Transport Policy*. 2006. № 13(5), 413–425 <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
- 3.Shafahi Y., Khani, A. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2010. №44(6). <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.007>
- 4.Tuzun A., Yilmaz S. Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*. 2014. № 37(5). <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
- 5.Wu J., Liu M., Sun H., Li T., Gao Z., Wang, D. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 51. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
- 6.Wu Y., Tang J., Yu Y., Pan Z. A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 52, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>

- 7.Naumov V., Samchuk G. Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*. 2017. № 187, 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>
- 8.Naumov V. Synchronization of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2018. № 36, 44–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_4
- 9.Shang P., Li R., Liu Z., Xian K., Guo, J. Timetable synchronization and optimization considering time-dependent passenger demand in an urban subway network. *Transportation Research Record*. 2018. №2672(8), 243– 254. <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
- 10.E. Khmeleva, A. A. Hopgood, L. Tipi, M. Shahidan. Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem. *KI-Kunstliche Intelligenz*. 2018. Vol. 32, № 1, 61–75. doi: 10.1007/s13218-017-0516-6
- 11.Cao Z., Ceder A., Li D., Zhang S. Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. 23-1249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
- 12.Chen Y., Mao B., Bai Y., Ho T., Li Z. Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. № 99(2), 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
- 13.Wang Y., Li D., Cao Z. Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. № 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
- 14.X. Wang, M. Liu, Y. Ci, Y. Yang. Effectiveness of driver's bounded rationality and speed guidance on fuel-saving and emissions-reducing at a signalized intersection. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 2021, 1– 15, DOI:[10.1016/j.jclepro.2021.129343](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129343)
- 15.Nesmachnow S., Risso, C. Exact and Evolutionary Algorithms for Synchronization of Public Transportation Timetables Considering Extended Transfer Zones. *Applied Sciences*. 2021. №11(15), 7138. <https://doi.org/10.3390/app11157138>
- 16.Wang Y., Zhou Y., Yan X. Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment. *Expert Systems with Applications*. 2022. №193, 478-492. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116430>
- 17.Zhao Hu, Feng Shumin, Ci Yusheng, Xin Mengwei, Huang Qiuju. Scheduling Synchronization for Overlapping Segments in Bus Lines: Speed Control and Green Extension Strategies. *Journal of Advanced Transportation*. 2022, 2428040, 10 p. <https://doi.org/10.1155/2022/2428040>
- 18.Naeini H., Shafahi Y., Taherkhani, M. Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. № 22. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
19. Cheng G, He Y. Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization. *Electronic Research Archive*, 2024, 32(1), 565-583. <https://doi.org/10.3934/era.2024028>
- 20.Sun M, Liang C, Chang D. Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology. *PLoS One*. 2024. №19(2):e0297069. doi: 10.1371/journal.pone.0297069.
- 21.Naumov V., Taran I., Melnikova Y., Kapica D. Minimizing passenger waiting in public transport: A genetic algorithm approach to bus schedule synchronization. *Proceedings of 28th International scientific conference Transport Means*. 2024. 91–96. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P91-96>
22. R  ther C., Rieck J. A Bayesian Optimization Approach for Tuning a Grouping Genetic Algorithm for Solving Practically Oriented Pickup and Delivery Problems. *Logistics*. 2024. 8(1):14. <https://doi.org/10.3390/logistics8010014>
23. Мельнікова Ю. І. Аналіз впливу параметрів на ефективність застосування генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації руху громадського транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. №13(44), с. 424–432. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).424-432](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).424-432)

REFERENCES

- 1.Cevallos, F., & Zhao, F. (2006). Minimizing Transfer Times in Public Transit Network with Genetic Algorithm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1971(1), 74-79. <https://doi.org/10.1177/0361198106197100109>
2. Shrivastava, P., & O'Mahony, M. (2006). A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules—A genetic algorithms approach. *Transport policy*, 13(5), 413-425. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
3. Shafahi Y, Khani A (2010) A practical model for transfer optimization in a transit network: model formulations and solutions. *Transp Res A Policy Pract* 44(6):377–389 DOI: [10.1016/j.tra.2010.03.007](https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.007)

4. Tuzun Aksu, D., & Yilmaz, S. (2014). Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*, 37(5), 450–465. <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
5. Wu, J., Liu, M., Sun, H., Li, T., Gao, Z. & Wang, D.Z.W. (2015). Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 51. pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
6. Wu, Y., Tang, J., Yu, Y., & Pan, Z. (2015). A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 52, pp. 15–31.. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>
7. Naumov, V., & Samchuk, G. (2017). Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*, 187, 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>
8. Naumov, V. (2018). Synchronization of timetables for public bus lines using genetic algorithms and computer simulations. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 36, 44–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_4
9. Shang, P., Li, R., Liu, Z., Xian, K., & Guo, J. (2018). Timetable synchronization and optimization considering time-dependent passenger demand in an urban subway network. *Transportation Research Record*, 2672(8), 243–254. <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
10. Khmeleva, E., Hopgood, A. A., Tipi, L., & Shahidan, M. (2018). Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem. *Künstliche Intelligenz*, 32(1), 61–75. <https://doi.org/10.1007/s13218-017-0516-6>
11. Cao, Z., Ceder, A., Li, D., & Zhang, S. (2019). Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 231–249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
12. Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T., & Li, Z. (2019). Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99(2), 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
13. Wang, Y., Li, D., & Cao, Z. (2020). Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
14. Wang, X., Liu, M., Ci, Y., & Yang, Y. (2021). Effectiveness of driver's bounded rationality and speed guidance on fuel-saving and emissions-reducing at a signalized intersection. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129343>
15. Nesmachnow, S., & Risso, C. (2021). Exact and Evolutionary Algorithms for Synchronization of Public Transportation Timetables Considering Extended Transfer Zones. *Applied Sciences*, 11(15), 7138. <https://doi.org/10.3390/app11157138>
16. Wang, Y., Zhou, Y., & Yan, X. (2022). Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment. *Expert Systems with Applications*, 193, 116430. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116430>
17. Zhao, H., Feng, S., Ci, Y., Xin, M., & Huang, Q. (2022). Scheduling Synchronization for Overlapping Segments in Bus Lines: Speed Control and Green Extension Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/2428040>
18. Motvallian Naeini, H., Shafahi, Y., & SafariTaherkhani, M. (2022). Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 22, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
19. Cheng, G., & He, Y. (2024). Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization. *Electronic Research Archive*, 32(1), 565–583. <https://doi.org/10.3934/era.2024028>
20. Sun, M., Liang, C., & Chang, D. (2024). Enhancing shipyard transportation efficiency through dynamic scheduling using digital twin technology. *PLOS ONE*, 19(2), e0297069. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297069>
21. Naumov, V., Taran, I., Melnikova, Y., & Kapica, D. (2024). Minimizing Passenger Waiting in Public Transport: A Genetic Algorithm Approach to Bus Schedule Synchronization. *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p91-96>
22. Rütther, C., & Rieck, J. (2024). A Bayesian Optimization Approach for Tuning a Grouping Genetic Algorithm for Solving Practically Oriented Pickup and Delivery Problems. *Logistics*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/logistics8010014>

23. Melnikova Yu. I. Analiz vplyvu parametriv na efektyvnist zastosuvannya henetychnoho alhorytmu pry vyrishenni zadachi synkhronizatsii rukhu hromadskoho transportu. Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2026. №13(44), s. 424–432. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).424-432](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).424-432)

Yu. Melnikova, O. Orda. Systematization of approaches to parameters settings of genetic algorithms for optimizing public transport schedules

The research investigates the problem of the practical implementation efficiency of genetic algorithms (GAs) for public transport schedule synchronization, specifically focusing on the impact of heuristic parameter selection.

The purpose of the research is to systematically summarize contemporary scientific approaches to justifying the parametric tuning of genetic algorithms for synchronizing public transport timetables, and to identify the specifics of parameter selection in research aimed at improving the efficiency and reliability of solutions under variable transport network operating conditions. The study employs methods of systemic and comparative analysis of current scientific works dedicated to the use of GAs in transport schedule optimization problems.

The findings of current scientific works on the influence of GAs parametric tuning on its functional capacity and result relevance in solving the timetable synchronization problem have been systematized. The key GAs tuning parameters that form the architecture of the computational process were identified: population size, crossover probability, and mutation probability. It was established that in the majority of analysed scientific works these parameters are determined empirically without adequate theoretical justification, indicating the need to develop methodological approaches to their selection. A critical analysis of existing works revealed that researchers pay insufficient attention to the heuristic selection of GAs parameters when solving the public transport timetable synchronization problem, which limits the reliability of algorithmic solutions under variable transport network operating conditions. A promising direction for further research was identified, consisting in the development of adaptive GAs parameter tuning strategies to enhance solution efficiency and reliability in line with real public transport operating conditions.

The practical significance of the study lies in its systematized analytical generalization of existing approaches, which will enable researchers and transport industry specialists to use the findings as a toolkit for justifying GAs parametric tuning in order to improve the effectiveness of its application in solving public transport timetable synchronization problems.

Keywords: public transport, schedule synchronization, genetic algorithm, parameters tuning, systematic analysis

МЕЛЬНИКОВА Юлія Ігорівна, старший викладач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», аспірантка кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: melnikova.yu.i@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

ОДРА Олександра Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: orda@khadi.kharkov.ua, ORCID 0000-0002-7213-8469

Yuliia MELNIKOVA, Senior Lecturer of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, Postgraduate of Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: melnikova.yu.i@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

Oleksandra ORDA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: orda@khadi.kharkov.ua [PhD in Technical Sciences, Associate Professor, v.ua](#), ORCID 0000-0002-7213-8469

Дата надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/2r6v8v17>

Мисів О.О., Криштопа С.І., Добуш А.І., Сем'янчук А.І., Радзіховська Н.М.
Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ МОБІЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті вивчаються питання розрахунку та підвищення енергоефективності насосів високого тиску, що застосовуються на мобільних агрегатах технологічного транспорту. Як перспективний напрям покращення енергозбережувальності зазначених мобільних агрегатів запропоновано здійснити розрахунок енергоефективності насосів високого тиску мобільних агрегатів з метою встановлення аналітичних залежностей витрат енергії від зміни робочої температури оливи насосів агрегатів технологічного транспорту. Проведено аналіз сучасних публікацій та наукових досліджень, які присвячені тематиці розрахунку насосів високого тиску агрегатів технологічного транспорту, а також встановлено, що на роботу насосів високого тиску впливає багато несприятливих факторів, що призводять до зростання енерговитрат, тому розробка математичного апарату визначення енергетичних витрат мобільних насосних агрегатів є ефективним інструментом енергозаощадження. З цієї причини у статті створена розрахункова модель енергетичних витрат насосів високого тиску мобільних агрегатів технологічного транспорту та на її основі зроблена оцінка енергетичних витрат насосу високого тиску НТ-400 мобільного агрегату Halliburton Tier IV DGB. Згідно одержаних експериментальних досліджень максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску НТ-400 мобільних насосних агрегатів технологічного транспорту Halliburton Tier IV DGB досягався за температури 53 °C і дорівнює 0,89; максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску за даними розрахункової моделі досягався за температури 55 °C і дорівнює 0,87. Ґрунтуючись на одержаних експериментальних результатах, можна з упевненістю підтвердити життєздатність розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних агрегатів технологічного транспорту.

Ключові слова: розрахунок насосів високого тиску, утилізація відпрацьованого тепла; технологічний транспорт; двигун; паливна економічність, енергоефективність; об'ємний ККД.

ВСТУП

Підвищення енергоефективності в транспортній галузі України – це комплексний процес, що поєднує технологічне оновлення, цифрову трансформацію та впровадження сучасного менеджменту. Реалізація цих заходів дозволить українським компаніям залишатися конкурентоспроможними на європейському ринку та забезпечувати сталий розвиток галузі в довгостроковій перспективі. Ключовими напрямками підвищення енергоефективності в транспортній галузі України є: глибока модернізація існуючого застарілого енерговитратного обладнання; перехід на сучасні економічні приводи та використання обладнання з вищим ККД; широке впровадження систем рекуперації енергії; використання енергії із відновлюваних джерел; моніторинг комплексного енергоспоживання обладнання в реальному часі; впровадження автоматизованих системи керування енерговитратами устаткування; застосування цифровізації та "Smart" технологій в напрямку підвищення енергоефективності в транспортній галузі України; забезпечення переходу України в напрямку нормативно-правового регулювання енергозбереження в транспортному секторі на міжнародні стандарти.

Для досягнення поставлених енергетичною політикою задач необхідно максимально знижувати в транспортній галузі України енерговитрати для всіх типів технологічного обладнання, яке використовується в промисловості України і, в тому числі, це повною мірою стосується як енергоефективної експлуатації технологічного транспорту в цілому, так і такої важливої його частини, як мобільні насосні агрегати. Для зниження енергетичних витрат мобільних насосних агрегатів необхідно розробити розрахункову модель насосів високого тиску.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На енерговитрати та ресурс насосів високого тиску впливає багато факторів. Їх можна розділити на три види: швидкі процеси, середньої швидкості та повільні [1]. Швидкі процеси характеризуються періодичністю зміни параметрів, що визначаються частками секунд.

До таких процесів відносяться вібрації елементів, резонансне збудження, пульсації тиску в робочих порожнинах насосів високого тиску. Ці процеси суттєво впливають на збільшення енерговитрат насосів; на взаємне розташування елементів та порушують їх взаємозв'язок; спотворюють загальний робочий процес насосів. Як правило, вони призводять до раптових відмов. Наприклад, у насосі високого тиску УНБ 2В-400×70 найчастішою такою відмовою є втрата работоздатності впускних та випускних клапанів [2], як правило, внаслідок виникнення пікових

тисків, які з різних причин можуть коливатися від 70 до 80 МПа. Витрати енергії за часткової втрати роботоzдатності впускних та випускних клапанів насосу можуть зростати від 22 до 43 % [3].

Процеси середньої швидкості протікають протягом робочого циклу насосів високого тиску, їх тривалість вимірюється хвилинами і годинами. До таких процесів відносяться зміни температури робочого тіла, густини, фізичних властивостей робочої рідини та ін. Ці процеси призводять до поступових відмов. Витрати енергії, наприклад, за зміни фізичних властивостей робочої рідини можуть зростати від 11 до 19 % [4].

Повільні процеси діють протягом усього періоду експлуатації насосів високого тиску. До них відносяться зношування деталей, що труться, природне старіння і втома матеріалів, сезонна зміна температури і вологості. Вони є, зазвичай, причинами поступових відмов. Витрати енергії насосів, наприклад, за сезонного зниження температури від + 20 °С до мінус 10 °С можуть зростати від 12 до 26 % [5].

За фізичною природою всі фактори, що впливають на енергоефективність насосів високого тиску в процесі експлуатації, можна поділити на три групи: кліматичні, гідравлічні та механічні. До механічних чинників відносяться вібрація, удари та навантаження, що виникають у насосах високого тиску [6].

Удар характеризується перетворенням кінетичної енергії зовнішніх сил на потенційну енергію деформації елементів конструкції та зворотне перетворення пружної деформації елементів конструкції на кінетичну енергію. Внаслідок цього в крихких матеріалах з'являються тріщини та злами. Можливий діапазон перевантажень, що викликаються ударами, надзвичайно великий – від нуля до $2 \cdot 10^3 g$ [7]. Вібрація – це механічні коливання в насосах високого тиску, що не є невід'ємною умовою виконання ним своїх функцій, а виникають внаслідок недосконалості конструкції, дефектів та особливих умов експлуатації.

Навантаження, що виникають внаслідок силової взаємодії приводу з довкіллям, поділяють на позиційні та інерційні. Позиційне навантаження впливає переважно на статичні характеристики. Постійна протидія або супутня сила на вихідній ланці приводу призводить до зменшення або збільшення швидкості вихідної ланки. Позиційне навантаження на вихідній ланці деформує амплітудно-частотну характеристику та збільшує фазові зрушення, що змінює запаси стійкості та швидкодію приводу. Інерційне навантаження впливає динамічні властивості приводу. Воно обумовлює появу резонансних режимів коливальних перехідних процесів у гідросистемі. Всі механічні чинники підвищують витрати енергії насосів високого тиску [8].

До гідравлічних факторів відносяться: чистота, температура, газонасиченість (вміст повітря) та старіння оливи (робочої рідини). Олива в насосах високого тиску є носієм енергії, тому будь-які процеси, що призводять до зміни її характеристик, спричиняють підвищені витрати енергії. Надійна робота насосів високого тиску багато в чому залежить від якості оливи. Для правильної експлуатації насосів високого тиску необхідно оцінити причини зміни властивостей оливи та їх вплив на енергетичні втрати та роботоzдатність насосів загалом [9].

При роботі насосів високого тиску в робочу рідину безперервно надходять продукти зношування поверхонь тертя, а також відбувається дифузія в неї запиленого повітря. При великих тисках оливи рідини, що є характерним саме для насосів високого тиску, забруднення у вигляді твердих частинок з великою інтенсивністю діють на поверхні деталей подібно абразивної емульсії. При забрудненні робочої оливи спостерігається інтенсивне зношування насосів, у результаті знижується об'ємний ККД та зростають витрати енергії на привід [10].

З часом у насосах збільшуються зазори, зменшуються перекриття, змінюються коефіцієнти витрат отворів. При збільшенні витоків рідини через зношування елементів насосів високого тиску зменшується жорсткість системи. При забрудненнях різко зростають зусилля, необхідні для переміщення плунжерів, що, своєю чергою, призводить до зростання витрат енергії [11].

Кліматичні фактори активно впливають на зміну характеристик робочої оливи та елементів гідросистеми загалом. До них відносяться – температура, вологість, сонячна радіація та запиленість навколишнього середовища. В результаті контакту з оливою повітря навколишнього середовища до оливи потрапляє вода, що сприяє посиленому окисленню робочої рідини. Це призводить до утворення продуктів окисної полімеризації – асфальтенів, які викликають «засмолення» сіток фільтроелементів і виходу з ладу фільтра, утворення відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів і каналів насосів високого тиску [12].

Попадання повітря навколишнього середовища в робочу оливу сприяє виникненню кавітації: у всмоктувальному трубопроводі в умовах розрідження відбувається інтенсивне виділення повітряних

бульбашок в оливі, які викликають шумові ефекти - вібрацію і роз'їдання поверхні насосів, гідроагрегатів і трубопроводної арматури [13].

Наявність у оливі повітря навколишнього середовища та навіть невеликої кількості води (до 0,1 % за масою) може призвести до піноутворення. Піноутворення знижує змащувальні властивості оливи, викликає утворення стійких емульсій, коронування та підвищене зношування поверхонь тертя, що призводить в кінцевому результаті до підвищених втрат енергії. Крім того, стиск повітряних бульбашок супроводжується виділенням теплоти, яке значно перевищує температуру цієї бульбашки, а, отже, каталізує процеси окислення і розкладання оливи, що контактує з ним [14].

Вода в робочій рідині може утримуватися в розчиненому та вільному вигляді. Кількість нерозчиненої води у насосах високого тиску в літніх умовах становить 0,001...0,54 % за масою, взимку може досягати 1 % [15].

Температурний режим роботи насосів високого тиску визначається в'язкістю - однією з найважливіших характеристик робочої рідини, що зумовлює внутрішнє тертя рідини [16]. Зі збільшенням температури в'язкість оливи зменшується, зростають витоки через ущільнення та сполучення агрегатів. Час підйому навісного механізму збільшується, швидкодія гідросистем знижується. Значне підвищення температури може призвести до руйнування оливної плівки між поверхнями тертя, що призводить до істотного зростання енерговитрат і, навіть, до виходу з ладу насосу.

Руйнування оливної плівки призводить до напівсухого тертя, що ще більше сприяє перегріву поверхонь, що труться. При зниженні температури в'язкість збільшується, проте збільшуються і опори потоку оливи в трубопроводах, погіршується заповнення всмоктувальної порожнини насоса. Має місце інтенсивне піноутворення, продуктивність насоса знижується, енерговитрати – збільшуються [17].

Отже, на роботу насосів високого тиску впливає безліч несприятливих факторів, що призводять до зростання енерговитрат, тому розробка математичної моделі визначення енергетичних витрат мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів є ефективним інструментом енергозаощадження.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього дослідження є розробити розрахункову модель насосів високого тиску для зниження енергетичних витрат мобільних насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

розробка основних припущень розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів;

створення розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів;

оцінка енергетичних витрат насосу високого тиску HT-400 Halliburton мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB на підставі створеної розрахункової моделі;

аналіз отриманих результатів створеної розрахункової моделі шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета і основні припущення розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів

Метою розрахунку є створення розрахункової моделі роботи насосу високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів з системою оптимального температурного регулювання.

В розробленій розрахунковій моделі прийняті такі припущення:

-ізотерічність процесу: незважаючи на високий тиск припускаємо, що температура рідини залишається постійною протягом одного циклу нагнітання;

-незмінність зазорів: припускаємо, що геометричні розміри деталей (плунжерів, циліндрів і т.д.) не змінюються під дією тиску, хоча в реальності відбувається певна пружна деформація;

-миттєве спрацювання клапанів: у спрощених моделях вважаємо, що клапани відкриваються або закриваються миттєво при досягненні певної різниці тисків;

- мінімальна різниця температур між робочими тілами під час процесів теплообміну – приймається 1 °С;

- постійність фізичних властивостей: густина та в'язкість оливи вважаються сталими;

- ідеальна герметичність: припускаємо, що витоками через ущільнення нехтуємо, вважаючи об'ємний ККД рівним 1;

- процеси стиснення оливи в насосі – адіабатні.

Вихідні дані для розрахунку

У сучасних насосах високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів використовуються оливи, які є близькими за своїми фізико-хімічними властивостями. Наприклад, оливи M-14B₂, YUKO API CC SAE 40 та «Бурол» для насосів високого тиску СІН-32, СІН-63, НБ-32, НБ-50; оливи Shell Rimula R2 40, HVLP-D 68 для насосів високого тиску 4P-700, F-500, F-800, F-1250.

Подальші розрахунки будемо проводити для розповсюджених в даний час в Україні насосів високого тиску 4P-700 та F-1250 з робочою оливою Shell Rimula R2 40. Для оливи Shell Rimula R2 40, що використовується як робоча олива для насосів високого тиску 4P-700 та F-1250 робочий інтервал роботи інтервал становить +5 ...+85 °С. Температура на виході привідного дизельного двигуна - 90 °С, температура на вході оливорідінного теплообмінного апарату - 85 °С.

Технічні характеристики деяких насосів, що використовуються у мобільних насосних агрегатах для гідравлічного розриву пластів в нафтогазовій галузі України наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічна характеристика деяких насосів, що використовуються в Україні у мобільних насосних агрегатах

Модель насоса	Країна і фірма виробник	Діаметр плунжера, мм	Тиск, МПа		Подача, л/с		Число подвійних ходів за хв.	Потужність, кВт
			макс.	мін.	макс.	мін.		
УНБ 2В-400×70	Україна, Київський завод бурової техніки	120 90	70	40	12,4	-	180	250
ЗРСФ - 300	Румунія	115 100	70	53	36	15	450	300
4P-700	Україна, Коростенський завод бурової техніки	120 100	70	20,7	22	6,3	280	650
1WS	США, "Нейшнл"	-	70	-	20	-	400	550
"Сларш Мастер"	США, "Вестерн"	-	70	-	40	-	450	700
TWS 2250	США, SPM	114 127	103,4 84,1	56,3 43,2	27,5 35,8	14,9 18,4	330	1640
"Пейс-мейкер"	США, "Доуел"	101 114 127	70	-	32	24	800	750
T-10-AC	США, "Халібуртон"	100 114	70	-	30	-	450	450
HT-400	США, "Халібуртон"	85,7 114	137,9 77,2	35,5 20,0	16,1 28,6	4,15 7,41	450	600

Опис розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних насосних агрегатів

Дана розрахункова модель за зміною параметрів у часі відноситься до динамічного типу, так як параметри в часі є змінними. За способом складання та опису дана розрахункова модель є змішаною, тому що в ній застосовувались як функціональні залежності величин (наприклад, фізичні властивості речовин), так використовувались і табличні значення параметрів (наприклад, коефіцієнти тепловіддачі).

Завданнями розробки розрахункової моделі є раціоналізація енергетичного балансу насосів високого тиску мобільних насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів; забезпечення оптимального температурного та енергетичного режимів роботи насосів високого тиску; оцінювання енергетичних витрат насосів високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів.

Під оптимальним режимом роботи насосів високого тиску, в тому числі мобільних насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів, розуміється такий режим функціонування, при якому сумарні енергетичні витрати на подолання внутрішніх сил опору в насосах високого тиску будуть мінімальними. Розрахунок основних параметрів енергетичних витрат насосів високого тиску і

техніко-економічних показників мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів будемо проводити в інтервалі температур робочої рідини, що забезпечують її максимальну енергоефективність та високий ресурс.

Рівняння теплового балансу теплообмінного апарату без врахування втрат теплоти в навколишнє середовище і фазових переходів:

$$Q = G_1 C_{pm1} (t_1' - t_1'') = G_2 C_{pm2} (t_2'' - t_2'), \quad (1)$$

де G_1, G_2 – масові витрати відповідно антифризу та оливи насосу високого тиску в теплообміннику, кг/с; C_{pm1}, C_{pm2} – середні масові ізобарні теплоємності при постійному тиску антифризу та оливи насосу високого тиску, Дж/(кг·К); t_1', t_1'' – температура антифризу на вході і виході з теплообмінного апарату, °С; t_2', t_2'' – температура оливи насосу високого тиску на вході і виході з теплообмінного апарату, °С;

Оскільки в загальному випадку температури рідин всередині теплообмінного апарату не є постійними, рівняння теплопередачі справедливе тільки в диференціальній формі для елемента поверхні теплообміну dF , тобто:

$$dQ = k_i \Delta t_i dF_i, \quad (2)$$

а загальний тепловий потік через поверхню теплообміну визначається інтегралом цього виразу:

$$Q = \int_0^F k_i \Delta t_i dF_i. \quad (3)$$

Це і є розрахункове рівняння теплопередачі. Тут $\Delta t_{сеп}$ – середнє значення температурного напору по всій поверхні нагріву теплообмінника.

Поточна об'ємна температура оливи насосу високого тиску T_{nom} буде визначатись за формулою:

$$T_{nom} = T_0 + \Delta T, \quad (4)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, К; ΔT – зростання температури оливи за час $\Delta \tau$, К.

Зростання температури оливи визначається за формулою:

$$\Delta T = \frac{Q_{нагр}}{\Sigma(m_{н.і} \cdot C_{н.і}) + m_o \cdot C_o}, \quad (5)$$

де $m_{н.і}, m_o$ – маси складових насосу високого тиску та оливи в системі мащення, кг; $C_{н.і}, C_o$ – питомі теплоємності матеріалів складових насосу високого тиску та оливи в системі мащення, кДж/(кг·К); $Q_{нагр}$ – теплота, яка йде на нагрівання оливи в системі мащення насосу високого тиску за час $\Delta \tau$, кДж.

Теплота $Q_{нагр}$, яка йде на нагрівання оливи в системі мащення насосу високого тиску визначається за формулою:

$$Q_{нагр} = N_{втр} \cdot \Delta \tau - Q_{втрн.с.}, \quad (6)$$

де $N_{втр}$ – потужність, яка втрачена в елементах насосу високого тиску, Вт; $Q_{втрн.с.}$ – теплота, що відводиться з поверхні насосу високого тиску в навколишнє середовище, Дж.

Аналіз літературних джерел [4-9] показав, що основна частка теплоти, що відводиться з поверхні насосу високого тиску, припадає переважно на конвективний теплообмін. Інші види теплообміну майже не роблять великого впливу на тепловий стан насосу високого тиску, оскільки не перевищують 3-4 %. Величини втрат конвективної теплоти $Q_{втрн.с.}$ від бічних поверхонь насосу високого тиску визначаються на базі рівняння Ньютона-Ріхмана за формулою:

$$Q_{втрн.с.} = \alpha_{н.в.т.} \cdot F_{н.в.т.} \cdot (1 - \beta_{заб}) \cdot (T_{потст} - T_0), \quad (7)$$

де $\alpha_{н.в.т.}$ - середній по поверхні насосу високого тиску коефіцієнт тепловіддачі, Дж / (м² · К); $F_{н.в.т.}$ - площа поверхні насосу високого тиску, яка бере участь в тепловіддачі, м²; $\beta_{заб}$ - коефіцієнт зниження конвекції через забруднення поверхонь тепловіддачі насосу високого тиску; за даними [10] коефіцієнт $\beta_{заб}$ коливається в межах 0,025...0,035; $T_{потст}$ - середні поточні температури поверхонь зовнішніх стінок насосу високого тиску, К.

Потужність $N_{втр}$, яка втрачена в елементах насосу високого тиску визначається за формулою:

$$N_{втр} = N_{гидрпн} \cdot (1 - \eta_{о.н} \cdot \eta_{г.н}) + N_{кан.с.м}, \quad (8)$$

де $N_{гидрпн}$ - втрати гідравлічної потужності насосу високого тиску, Вт; $N_{кан.с.м}$ - втрати потужності на дроселювання в каналах системи мащення насосу високого тиску, Вт; $\eta_{г.н}$ - гідромеханічний ККД насосу високого тиску, $\eta_{г.н} = 0,98$ [18]; $\eta_{о.н}$ - об'ємний ККД насосу високого тиску.

Гідравлічна потужність $N_{гидрпн}$ насосу високого тиску визначається за формулою:

$$N_{гидрпн} = P_n \cdot Q_n, \quad (9)$$

де P_n - робочий тиск насосу високого тиску, кПа; Q_n - подача насосу високого тиску, дм³/с.

Гідромеханічний ККД $\eta_{г.н}$ насосу високого тиску визначається за формулою:

$$\eta_{г.н} = \frac{N_{гидрпн}}{N_{номп}}, \quad (10)$$

де $N_{номп}$ - номінальна потужність, що підводиться до колінчастого вала насосу високого тиску, Вт.

Втрати потужності на дроселювання в каналах системи мащення $N_{кан.с.м}$ (кВт) насосу високого тиску визначаються за формулою:

$$N_{кан.с.м} = P_{кан.с.м} \cdot Q_n \cdot \eta_{о.н}, \quad (11)$$

де $P_{кан.с.м}$ - втрати тиску на дроселювання в каналах системи мащення, МПа.

Втрати тиску $P_{кан.с.м}$ на дроселювання в каналах системи мащення визначаються за формулою:

$$P_{кан.с.м} = P_{кан.дов} + P_{міцвтр}, \quad (12)$$

де $P_{кан.дов}$ - втрати тиску по довжині каналів системи мащення, МПа; $P_{міцвтр}$ - місцеві втрати тиску в системі мащення, МПа.

Втрати тиску по довжині каналів системи мащення $P_{кан.дов}$ визначаються за формулою:

$$P_{\text{кан.дов}} = \frac{L_{\text{кан.с.м.}} \cdot \rho_{\text{р.о.}} \cdot \mu_{\text{тер.ст}} \cdot v_{\text{ол.кан}}^2}{2 \cdot d_{\text{сер.кан}}}, \quad (13)$$

де $L_{\text{кан.с.м.}}$ - довжина каналів системи мащення, м; розбирання насосу високого тиску НБ-50 показало, що його довжина каналів системи мащення дорівнює 3,96 м; приймаємо $L_{\text{кан.с.м.}} = 4$ м; $\rho_{\text{р.о.}}$ - густина робочої оливи системи мащення, кг/м³; $\rho_{\text{р.о.}} = 860$ кг/м³ [19]; $V_{\text{ол.кан}}$ - середня швидкість робочої оливи в каналах системи мащення, м/с; середня швидкість робочої оливи в каналах системи мащення згідно [19] коливається в межах 1...2 м/с; приймаємо $v_{\text{ол.кан}} = 1,5$ м/с; $d_{\text{сер.кан}}$ - середній діаметр каналів системи мащення, м; розбирання насосу високого тиску НБ-50 показало, що його середній діаметр каналів системи мащення дорівнює 10 мм; приймаємо $d_{\text{сер.кан}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $\mu_{\text{тер.ст}}$ - коефіцієнт тертя робочої оливи о стінки каналів системи мащення.

Коефіцієнт тертя $\mu_{\text{тер.ст}}$ робочої оливи о стінки каналів системи мащення визначається за формулою Блаузіуса:

$$\mu_{\text{тер.ст}} = \frac{75 \cdot \nu_{\text{к.в}}}{V_{\text{ол.кан}} \cdot d_{\text{сер.кан}}}, \quad (14)$$

де $\nu_{\text{к.в}}$ - коефіцієнт кінематичної в'язкості робочої оливи, м²/с; для оливи «Бурол» насосу високого тиску НБ-50 $\nu_{\text{к.в}} = 65 \cdot 10^{-6}$ м²/с [20].

Місцеві втрати тиску $P_{\text{місцевтр}}$ в системі мащення визначаються за формулою:

$$P_{\text{місцевтр}} = \frac{\rho_{\text{р.о.}} \cdot v_{\text{ол.нас}}^2 \cdot \theta_{\text{м.втр}}}{2}, \quad (15)$$

де $\theta_{\text{м.втр}}$ - коефіцієнт місцевих втрат каналів мащення насосу високого тиску; коефіцієнт місцевих втрат каналів системи мащення насосів високого тиску $\theta_{\text{м.втр}} = 0,7 \dots 0,8$ [21]; приймаємо $\theta_{\text{м.втр}} = 0,7$; $v_{\text{ол.нас}}$ - середня швидкість робочої оливи на виході оливного насосу системи мащення, м/с; середня швидкість робочої оливи на виході оливного насосу системи мащення згідно [21] коливається в межах 15...20 м/с; приймаємо $v_{\text{ол.нас}} = 18$ м/с.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На підставі виконаних розрахунків зробимо оцінку енергетичних втрат, для прикладу, насосу високого тиску НТ-400 Halliburton мобільного агрегату Halliburton Tier IV DGB, який обладнано двома насосами НТ-400 Halliburton. Основні технічні характеристики одного насосу високого тиску НТ-400 Halliburton: максимальний робочий тиск $P_{\text{н}} - 137,9$ МПа; подача насосу за максимального робочого тиску $Q_{\text{н}} - 4,15$ дм³/с; номінальна потужність, що підводиться до колінчастого вала насосу високого тиску, $N_{\text{ном.н}} = 600$ кВт.

Гідравлічна потужність $N_{\text{гидрн}}$ насосу високого тиску НТ-400 Halliburton:

$$N_{\text{гидрн}} = 137,9 \cdot 10^3 \cdot 4,15 = 572,29 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 572,29 \text{ кВт}.$$

Гідромеханічний ККД $\eta_{\text{г.н}}$ насосу високого тиску НТ-400 Halliburton:

$$\eta_{\text{г.н}} = \frac{572,29}{600} = 0,954.$$

Потужність $N_{\text{втр}}$, яка втрачена в елементах насосу високого тиску НТ-400 Halliburton без врахування втрат потужності на дроселювання в каналах системи мащення:

$$N_{\text{втр}} = 572,29 \cdot (1 - 0,954 \cdot 0,98) = 37,35 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнт тертя $\mu_{\text{тер.ст}}$ робочої оливи о стінки каналів системи мащення:

$$\mu_{тер.ст} = \frac{75 \cdot 65 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 0,325$$

Втрати тиску $P_{кан.дов}$ по довжині каналів системи мащення:

$$P_{кан.дов} = \frac{4 \cdot 860 \cdot 0,325 \cdot 1,5^2}{2 \cdot 10^{-2}} = 125775 \text{ Па} = 125,8 \text{ кПа}$$

Місцеві втрати тиску $P_{місцвтр}$ в системі мащення насосу високого тиску НТ-400 Halliburton:

$$P_{місцвтр} = \frac{860 \cdot 7^2 \cdot 0,7}{2} = 97524 \text{ Па} = 97,5 \text{ кПа}$$

Втрати тиску $P_{кан.с.м}$ на дроселювання в каналах системи мащення:

$$P_{кан.с.м} = 125,8 + 97,5 = 223,3 \text{ кПа.}$$

Втрати потужності на дроселювання в каналах системи мащення $N_{кан.с.м}$ насосу високого тиску:

$$N_{кан.с.м} = 223,3 \cdot 4,15 \cdot 0,954 = 884 \text{ Вт}$$

Сумарна потужність $N_{втрс}$, яка втрачена в елементах насосу високого тиску НТ-400 Halliburton з врахуванням втрат потужності на дроселювання в каналах системи мащення:

$$N_{втрс} = 37,35 + 0,88 = 38,23 \text{ кВт.}$$

Таким чином, енергетичні втрати одного насосу високого тиску НТ-400 Halliburton мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB під час його роботи на режимі максимальної потужності складуть 38,23 кДж.

Промислові дослідження проводились на експериментальній установці, що була створена на базі мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес 4150 (рис. 1) транспортного цеху Управління транспорту ПАТ «Укрнафта» в м. Надвірна. Агрегат Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес або Кенворт широко використовується в НГВУ «Надвірна нафтогаз», «Долина нафтогаз» та інших НГВУ для гідравлічного розриву пластів, а його навісне обладнання є типовим для сучасних мобільних агрегатів гідравлічного розриву пластів.

Експериментальні значення об'ємного ККД насосів високого тиску НТ-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB та насосів високого тиску 4Р-700 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів УН1-630×700 в залежності від температури робочої оливи насосів та порівняння їх із розрахунковими значеннями наведено на рис. 2.



Рисунок 1. Проведення промислових випробовувань на базі мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів мод. Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес 4150 (8x8)

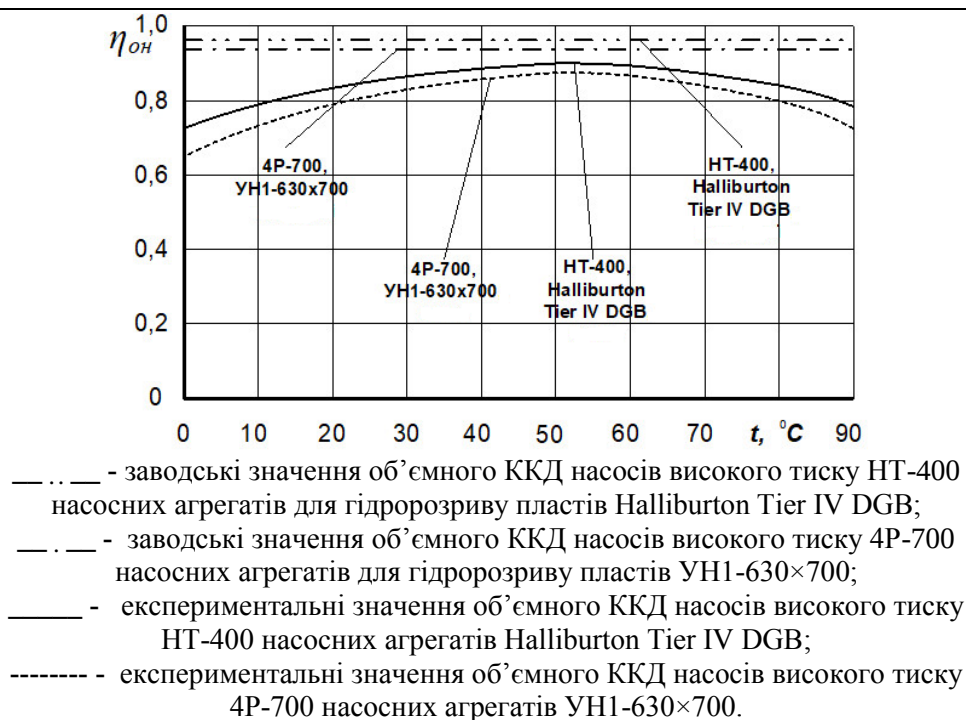


Рисунок 2. Експериментальні значення та розрахункові значення об'ємного ККД насосів високого тиску в залежності від температури робочої оливи насосів

ВИСНОВКИ

Мета цього дослідження полягала в розробці розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів. На основі створеної розрахункової моделі енергетичних витрат насосу високого тиску була зроблена оцінка енергетичних витрат насосу високого тиску HT-400 Halliburton мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB.

Аналіз отриманих результатів створеної розрахункової моделі шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень показав наступне. Згідно даних заводів-виготовників об'ємний ККД нового справного насосу високого тиску HT-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB складає 0,96; об'ємний ККД нового справного насосу високого тиску за даними математичної моделі складає 0,94. Згідно одержаних експериментальних досліджень максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску HT-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB досягався за температури 53 °C і дорівнює 0,89; максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску за даними математичної моделі досягався за температури 55 °C і дорівнює 0,87.

Грунтуючись на одержаних експериментальних результатах, можна з упевненістю підтвердити життєздатність математичної моделі енергетичних витрат насосу високого тиску мобільних агрегатів для гідравлічного розриву пластів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sun, J., Qin, Y., Liu, R., Wang, G., Liu, D., & Yang, Y. (2023). Cycle Characteristics of a New High-Temperature Heat Pump Based on Absorption–Compression Revolution. *Energies*, 16(11), 4267.
2. Borriello, P., Frosina, E., Lucchesi, P., & Senatore, A. (2024). Comparative Analysis of Simulation Methodologies for Spindle Pumps. *Fluids*, 9(2), 44.
3. Guo, J.; Yang, Y.; Li, H.; Wang, J.; Tang, A.; Shan, D.; Huang, B. A hybrid deep learning model towards fault diagnosis of drilling pump. *Appl. Energy* 2024, 372, 123773.
4. Li, G.; Hu, J.; Ding, Y.; Tang, A.; Ao, J.; Hu, D.; Liu, Y. A novel method for fault diagnosis of fluid end of drilling pump under complex working conditions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2024, 248, 110145.
5. Guo, J.; Yang, Y.; Li, H.; Dai, L.; Huang, B. A parallel deep neural network for intelligent fault diagnosis of drilling pumps. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2024, 133, 108071.

6. Zhang, Z.; Xiang, S.; Huo, H.; Xie, T.; Zhang, X.; Xu, J. Effect of pump start-stop operation in drilling of offshore Extreme-HPHT directional wells upon bottomhole transient fluctuating pressure. *Geoenergy Sci. Eng.* 2024, 235, 212708.
7. Shaohu, L.; Yuandeng, W.; Rui, H. Prediction of drilling plug operation parameters based on incremental learning and CNN-LSTM. *Geoenergy Sci. Eng.* 2024, 234, 212631.
8. Yehia, T.; Gasser, M.; Ebaid, H.; Meehan, N.; Okoroafor, E.R. Comparative analysis of machine learning techniques for predicting drilling rate of penetration (ROP) in geothermal wells: A case study of FORGE site. *Geothermics* 2024, 121, 103028.
9. Yang WANG, Honghua SU, Ning QIAN, Kui LIU, Jianbo DAI, Zhengcai ZHAO, Wenfeng DING, Neck-spinning quality analysis and optimization of process parameters for plunger components: Simulation and experimental study, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 34, Issue 4, 2021, Pages 174-191.
10. Xu, B., Zhang, J., & Yang, H. (2012). Investigation on structural optimization of anti-overturning slipper of axial piston pump. *Science China Technological Sciences*, 55(11), 3010-3018.
11. Hongbin Tang, Zheng Fu, Yi Huang, A fault diagnosis method for loose slipper failure of piston pump in construction machinery under changing load, *Applied Acoustics*, Volume 172, 2021, 107634.
12. Jiming Ma, Juan Chen, Jia Li, Qilin Li, Chunyu Ren, Wear analysis of swash plate/slipper pair of axis piston hydraulic pump, *Tribology International*, Volume 90, 2015, Pages 467-472.
13. Wanlu Jiang, Zhi Zheng, Yong Zhu, Yang Li, Demodulation for hydraulic pump fault signals based on local mean decomposition and improved adaptive multiscale morphology analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumes 58-59, 2015, Pages 179-205.
14. Zhonghai MA, Shaoping WANG, Jian SHI, Tongyang LI, Xingjian WANG, Fault diagnosis of an intelligent hydraulic pump based on a nonlinear unknown input observer, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 31, Issue 2, 2018, Pages 385-394.
15. Bing Xu, Shaogan Ye, Junhui Zhang, Numerical and experimental studies on housing optimization for noise reduction of an axial piston pump, *Applied Acoustics*, Volume 110, 2016, Pages 43-52.
16. Yang Pan, Yibo Li, Minghui Huang, Yashi Liao, Dedong Liang, Noise source identification and transmission path optimisation for noise reduction of an axial piston pump, *Applied Acoustics*, Volume 130, 2018, Pages 283-292.
17. J.M. Bergada, S. Kumar, D.Ll. Davies, J. Watton, A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 36, Issue 4, 2012, Pages 1731-1751.
18. Menghang Dai, Zhiliang Liu, Jinrui Wang, Mingjian Zuo, Physics-driven feature alignment combined with dynamic distribution adaptation for three-cylinder drilling pump cross-speed fault diagnosis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 251, 2024, 110369.
19. Xiaoning Wang, Large-eddy Simulation of Sand Streamers in Wind-blown Sand, *Procedia Engineering*, Volume 61, 2013, Pages 108-110.
20. Deng, S., Pei, J., Wang, Y., & Liu, B. (2017). Research on drilling mud pump fault diagnosis based on fusion of acoustic emission and vibration technology. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59(8), 415-423.
21. Bejger, A., & Piasecki, T. (2013). Technical problems of mud pumps on ultra deepwater drilling rigs. *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*.
22. Piasecki, T., Bejger, A., & Kozak, M. (2016). The assessment of the operational suitability of mud pumps on deep water drillships depends on maintenance strategy. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, (46 (118), 49-53.

REFERENCES

1. Sun, J., Qin, Y., Liu, R., Wang, G., Liu, D., & Yang, Y. (2023). Cycle Characteristics of a New High-Temperature Heat Pump Based on Absorption-Compression Revolution. *Energies*, 16(11), 4267.
2. Borriello, P., Frosina, E., Lucchesi, P., & Senatore, A. (2024). Comparative Analysis of Simulation Methodologies for Spindle Pumps. *Fluids*, 9(2), 44.
3. Guo, J.; Yang, Y.; Li, H.; Wang, J.; Tang, A.; Shan, D.; Huang, B. A hybrid deep learning model towards fault diagnosis of drilling pump. *Appl. Energy* 2024, 372, 123773.

4. Li, G.; Hu, J.; Ding, Y.; Tang, A.; Ao, J.; Hu, D.; Liu, Y. A novel method for fault diagnosis of fluid end of drilling pump under complex working conditions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2024, 248, 110145.
5. Guo, J.; Yang, Y.; Li, H.; Dai, L.; Huang, B. A parallel deep neural network for intelligent fault diagnosis of drilling pumps. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2024, 133, 108071.
6. Zhang, Z.; Xiang, S.; Huo, H.; Xie, T.; Zhang, X.; Xu, J. Effect of pump start-stop operation in drilling of offshore Extreme-HPHT directional wells upon bottomhole transient fluctuating pressure. *Geoenergy Sci. Eng.* 2024, 235, 212708.
7. Shaohu, L.; Yuandeng, W.; Rui, H. Prediction of drilling plug operation parameters based on incremental learning and CNN-LSTM. *Geoenergy Sci. Eng.* 2024, 234, 212631.
8. Yehia, T.; Gasser, M.; Ebaid, H.; Meehan, N.; Okoroafor, E.R. Comparative analysis of machine learning techniques for predicting drilling rate of penetration (ROP) in geothermal wells: A case study of FORGE site. *Geothermics* 2024, 121, 103028.
9. Yang WANG, Honghua SU, Ning QIAN, Kui LIU, Jianbo DAI, Zhengcai ZHAO, Wenfeng DING, Neck-spinning quality analysis and optimization of process parameters for plunger components: Simulation and experimental study, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 34, Issue 4, 2021, Pages 174-191.
10. Xu, B., Zhang, J., & Yang, H. (2012). Investigation on structural optimization of anti-overturning slipper of axial piston pump. *Science China Technological Sciences*, 55(11), 3010-3018.
11. Hongbin Tang, Zheng Fu, Yi Huang, A fault diagnosis method for loose slipper failure of piston pump in construction machinery under changing load, *Applied Acoustics*, Volume 172, 2021, 107634.
12. Jiming Ma, Juan Chen, Jia Li, Qilin Li, Chunyu Ren, Wear analysis of swash plate/slipper pair of axis piston hydraulic pump, *Tribology International*, Volume 90, 2015, Pages 467-472.
13. Wanlu Jiang, Zhi Zheng, Yong Zhu, Yang Li, Demodulation for hydraulic pump fault signals based on local mean decomposition and improved adaptive multiscale morphology analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumes 58-59, 2015, Pages 179-205.
14. Zhonghai MA, Shaoping WANG, Jian SHI, Tongyang LI, Xingjian WANG, Fault diagnosis of an intelligent hydraulic pump based on a nonlinear unknown input observer, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 31, Issue 2, 2018, Pages 385-394.
15. Bing Xu, Shaogan Ye, Junhui Zhang, Numerical and experimental studies on housing optimization for noise reduction of an axial piston pump, *Applied Acoustics*, Volume 110, 2016, Pages 43-52.
16. Yang Pan, Yibo Li, Minghui Huang, Yashi Liao, Dedong Liang, Noise source identification and transmission path optimisation for noise reduction of an axial piston pump, *Applied Acoustics*, Volume 130, 2018, Pages 283-292.
17. J.M. Bergada, S. Kumar, D.Ll. Davies, J. Watton, A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 36, Issue 4, 2012, Pages 1731-1751.
18. Menghang Dai, Zhiliang Liu, Jinrui Wang, Mingjian Zuo, Physics-driven feature alignment combined with dynamic distribution adaptation for three-cylinder drilling pump cross-speed fault diagnosis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 251, 2024, 110369.
19. Xiaoning Wang, Large-eddy Simulation of Sand Streamers in Wind-blown Sand, *Procedia Engineering*, Volume 61, 2013, Pages 108-110.
20. Deng, S., Pei, J., Wang, Y., & Liu, B. (2017). Research on drilling mud pump fault diagnosis based on fusion of acoustic emission and vibration technology. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59(8), 415-423.
21. Bejger, A., & Piasecki, T. (2013). Technical problems of mud pumps on ultra deepwater drilling rigs. *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*.
22. Piasecki, T., Bejger, A., & Kozak, M. (2016). The assessment of the operational suitability of mud pumps on deep water drillships depends on maintenance strategy. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, (46 (118), 49-53.

O. Mysiv, S. Kryshchtopa, A. Dobush, A. Sem'yanchuk, N. Radzikhovska. Calculation of energy costs of mobile technological transport units.

The article studies the issues of calculating and increasing the energy efficiency of high-pressure pumps used on mobile units of technological transport. As a promising direction for improving the energy efficiency of the specified mobile units, it is proposed to calculate the energy efficiency of high-pressure

pumps of mobile units in order to establish analytical dependencies of energy consumption on changes in the operating temperature of the oil of pumps of units of technological transport. An analysis of modern publications and scientific research devoted to the topic of calculating high-pressure pumps of units of technological transport was carried out, and it was also established that the operation of high-pressure pumps is affected by many adverse factors that lead to an increase in energy consumption, therefore, the development of a mathematical apparatus for determining the energy consumption of mobile pumping units is an effective tool for energy saving. For this reason, the article creates a calculation model of energy consumption of high-pressure pumps of mobile units of technological transport and on its basis an assessment of energy losses of the high-pressure pump HT-400 of the Halliburton Tier IV DGB mobile unit is made. According to the obtained experimental studies, the maximum volumetric efficiency of a serviceable high-pressure pump HT-400 of Halliburton Tier IV DGB pumping units was achieved at a temperature of 53 °C and is equal to 0.89; the maximum volumetric efficiency of a serviceable high-pressure pump according to the calculation model was achieved at a temperature of 55 °C and is equal to 0.87. Based on the obtained experimental results, it is possible to confidently confirm the viability of the calculation model of the energy consumption of a high-pressure pump of mobile units of technological transport.

Keywords: calculation of high-pressure pumps, waste heat recovery; technological transport; engine; fuel economy, energy efficiency; volumetric efficiency.

МИСІВ Олег Олегович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: oleh.mysiv-a133-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0002-2116-9887

КРИШТОПА Святослав Ігорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817

ДОБУШ Андрій Ігорович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: andrii.dobush-a13324@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0008-5038-4299

СЕМ'ЯНЧУК Андрій Ігорович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua ORCID: 0009-0005-3664-7716

РАДЗИХОВСЬКА Надія Михайлівна, асистент кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: nradzihovskaa@gmail.com, ORCID: немає

Oleg MYSIV, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: oleh.mysiv-a133-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0002-2116-9887

Sviatoslav KRYSTOPA, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817

Andriy DOBUSH, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: andrii.dobush-a13324@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0008-5038-4299

Andriy SEMIANCHUK, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua ORCID: 0009-0005-3664-7716,

Nadiya RADZIKHOVSKA, Assistant, Assistant of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: nradzihovskaa@gmail.com, ORCID: немає

Дата надходження статті до видання: 29.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

<https://doi.org/10.36910/71ts7v21>

Никончук В.М.

*Національний університет водного господарства і природокористування, м. Рівне, Україна***ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ПЛАНІВ СТАЛОЇ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ 11 У МІСТАХ УКРАЇНИ**

Існуючий спектр досліджень розвитку міських транспортних систем свідчить про зростаючу увагу до проблеми забезпечення сталої мобільності населення як одного з ключових чинників безпеки, екологічної стабільності та якості життя у сучасних містах. Зростання рівня автомобілізації, перевантаження вулично-дорожньої мережі та збільшення інтенсивності транспортних потоків призводять до погіршення умов руху, зниження ефективності функціонування громадського транспорту та підвищення негативного впливу транспорту на довкілля. У світовій практиці одним із найбільш ефективних підходів до вирішення цих проблем визнано впровадження концепції сталої міської мобільності, яка реалізується через Плани сталої міської мобільності (Sustainable Urban Mobility Plan — SUMP).

У даній статті виконано системний аналіз імплементації Планів сталої міської мобільності у містах України з різним рівнем інституційної готовності до впровадження принципів SUMP. Дослідження базується на порівняльному аналізі показників автомобілізації, модального розподілу перевезень, рівня розвитку громадського транспорту та стану стратегічного планування мобільності. У результаті дослідження встановлено взаємозв'язок між наявністю затвердженого плану сталої мобільності та показниками якості функціонування транспортної системи міста. Показано, що міста, у яких впроваджуються принципи SUMP, характеризуються більш збалансованим модальним розподілом перевезень, вищою часткою громадського транспорту та кращими показниками доступності міського середовища. Визначено, що ключовими факторами успішної реалізації планів сталої мобільності є інституційна готовність муніципалітету, використання транспортного моделювання та цифрових систем аналізу даних, інтеграція транспортного і містобудівного планування, а також залучення міжнародної технічної підтримки. Отримані результати дозволяють поглибити уявлення про механізми впровадження концепції сталої міської мобільності та можуть бути використані при розробленні стратегічних документів розвитку міст України відповідно до вимог Цілі сталого розвитку 11.

Ключові слова: стала міська мобільність, SUMP, транспортна система міста, модальний розподіл, автомобілізація, транспортне планування, інтелектуальні транспортні системи, сталий розвиток, SDG 11.

ВСТУП

Сучасні міста стикаються зі зростанням транспортних потоків, підвищенням рівня автомобілізації населення та перевантаженням вулично-дорожньої мережі. Збільшення кількості приватних автомобілів призводить до утворення заторів, зниження швидкості руху транспорту, зростання викидів забруднювальних речовин і погіршення якості міського середовища. У результаті цього зменшується ефективність функціонування міської транспортної системи та погіршується доступність міського простору для населення.

У світовій практиці одним із найбільш ефективних підходів до вирішення цих проблем є впровадження концепції сталої міської мобільності, що реалізується через Плани сталої міської мобільності (Sustainable Urban Mobility Plans – SUMP). Такі плани передбачають інтегроване управління транспортною системою міста, розвиток громадського транспорту, підвищення ролі пішохідного та велосипедного руху, оптимізацію використання приватного автомобільного транспорту та зниження негативного впливу транспорту на довкілля.

Розробка та впровадження SUMP є важливим інструментом реалізації Цілі сталого розвитку 11 – “Сталий розвиток міст і громад”, яка передбачає створення безпечних, інклюзивних, доступних та екологічно сталих міських середовищ. У європейських країнах ці плани активно застосовуються як стратегічний інструмент управління транспортною системою міста, що дозволяє забезпечити баланс між мобільністю населення, економічним розвитком і екологічною безпекою.

На відміну від європейських міст, у містах України процес формування та впровадження планів сталої мобільності лише набирає обертів. Окремі міста, такі як Львів, Київ, Житомир, Вінниця, Полтава, Дніпро, Хмельницький, Чернівці, Луцьк, Тернопіль та Івано-Франківськ, уже розробляють або впроваджують відповідні стратегії. Водночас значна частина українських міст перебуває на етапі формування концептуальних підходів до управління транспортною системою на основі принципів сталої мобільності.

Недостатній рівень розвитку громадського транспорту, відсутність транспортного моделювання, низька якість пішохідної та велосипедної інфраструктури, а також недостатня координація між транспортним і містобудівним плануванням зумовлюють необхідність наукового дослідження ефективності впровадження SUMP у містах України.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблематика забезпечення сталого розвитку міських транспортних систем та формування парадигми «розумного міста» (Smart City) є об'єктом прискіпливої уваги провідних світових дослідників та міжнародних інституцій. Центральне місце у цьому дискурсі посідає Порядок денний сталого розвитку до 2030 року, прийнятий ООН, де в межах Цілі сталого розвитку 11 (SDG 11) акцентується увага на створенні інклюзивних, безпечних та екологічно стійких міських середовищ шляхом модернізації систем громадського транспорту та зниження антропогенного навантаження на довкілля [1-3].

Фундаментальним інструментом реалізації цих завдань у європейському науковому просторі визнано концепцію Планів сталої міської мобільності (Sustainable Urban Mobility Plans — SUMP). Базові засади SUMP, закладені у «Європейському пакеті міської мобільності» (Urban Mobility Package), зміщують фокус із традиційного збільшення пропускної здатності доріг на управління мобільністю населення та інтегроване просторове планування [4, 5]. У другому виданні Керівництва з розроблення SUMP (2019 р.) систематизовано методологію участі громадськості та оцінювання ефективності транспортної політики, проте залишається дискусійним питання адаптації цих механізмів до специфічних умов міст із перехідною економікою [6].

Значний внесок у розвиток теорії сталого транспортного планування зробили міжнародні організації OECD, World Bank та UN-Habitat. У їхніх роботах [7, 8] підкреслюється необхідність переходу від техноцентричного підходу до людиноцентричного управління (People-Oriented Urban Design). Дослідження підтверджують, що імплементація SUMP у європейських метрополіях дозволила не лише стабілізувати рівень автомобілізації, а й суттєво підвищити частку велосипедного та пішохідного руху (Modal Split) [9]. Водночас актуальним аспектом сучасних досліджень стає роль цифрових технологій та Інтелектуальних транспортних систем (ITS). Впровадження систем адаптивного керування трафіком та Big Data аналізу дозволяє нівелювати затори, проте складність інтеграції таких систем у застарілу інфраструктуру міст залишається бар'єром для багатьох країн [10, 11].

У сучасному дискурсі О. Чередніченко обґрунтовує концептуальний пріоритет інституційної модернізації, розглядаючи план сталої міської мобільності (SUMP) як фундаментальну стратегію [16]. З точки зору Т. Нагорного, цей підхід набуває просторово-часового виміру: він доводить, що сталий розвиток міста детермінований саме організацією громадського транспорту як ключового каркаса території [17]. Водночас, якщо для попередніх авторів акцент зміщений на стратегію та урбаністику, то наукова школа В. Долі, М. Давідіч забезпечує цю стратегію математичним базисом [18,19]. Вони пропонують моделі оптимізації потоків, без яких неможлива практична реалізація ідей Чередніченко чи Нагорного. У контексті безпекового та технологічного забезпечення, І. Грабовий та В. Поліщук акцентують на впровадженні ITS [20]. З їхньої позиції, сталість системи недосяжна без автоматизації управління, яка мінімізує людський фактор та оптимізує трафік у реальному часі. Своєю чергою, О. Ляшук та У. Плекан замикають цей цикл, розглядаючи мобільність не лише як транспортну задачу, а як інструмент економічної ефективності регіону, де розвинена інфраструктура стає фундаментом для сучасної логістики [21]. Особливе місце у вітчизняній науці посідають дослідження В. М. Никончук [22], яка фокусується на розвитку транспортно-логістичних систем та впровадженні принципів «зеленої логістики». Її роботи доводять, що інтеграція екологічних факторів у транспортні процеси є критичною для зниження негативного впливу на міську екосистему. У спільних працях кафедри транспортних технологій НУВГП також аналізується вплив інноваційних технологій на трансформацію транспортної інфраструктури [23].

Незважаючи на ґрунтовність наведених досліджень, аналіз свідчить про наявність певного наукового розриву. Більшість робіт зосереджена на окремих технічних або економічних аспектах (моделювання, організація руху, логістика). Водночас комплексне оцінювання ефективності імплементації SUMP як цілісного інструменту досягнення SDG 11 у містах України (зокрема в таких регіональних центрах, як Рівне, Житомир, Івано-Франківськ) залишається недостатньо формалізованим. Проблема ускладнюється стрімким зростанням автомобілізації та низьким рівнем координації між містобудівним та транспортним плануванням.

Таким чином, необхідність наукового обґрунтування механізмів впровадження планів сталої мобільності та оцінки їхнього впливу на трансформацію міського середовища в умовах України визначає актуальність та напрям даного дослідження.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Мета статті полягає у системному аналізі ефективності впровадження стратегій Sustainable

Urban Mobility Plan (SUMP) для забезпечення доступної, безпечної, екологічно сталої та інклюзивної міської мобільності у містах України, а також у визначенні ключових інституційних, технічних та організаційних факторів, що впливають на успішність реалізації цих планів..

Для досягнення поставленої мети визначено та вирішено такі завдання:

- проаналізувати інституційний та технічний стан імплементації Планів сталої міської мобільності у вибраних містах України та визначити їх відповідність європейським підходам SUMP;
- виконати компаративний аналіз основних параметрів транспортних систем (рівень автомобілізації, модальний розподіл, розвиток громадського транспорту) для оцінки ефективності впровадження стратегій сталої мобільності;
- визначити основні інфраструктурні, нормативно-правові та організаційні бар'єри, що впливають на реалізацію планів сталої мобільності;
- встановити ключові фактори успішного впровадження SUMP у містах України;
- сформулювати рекомендації щодо інтеграції принципів сталої міської мобільності у муніципальну політику розвитку міст.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Системне оцінювання імплементації Планів сталої міської мобільності (ПСММ) у вибраних містах України свідчить про глибоку трансформацію підходів до управління міськими транспортними системами. На відміну від традиційного транспортного планування, що фокусувалося на пропускній здатності доріг, SUMP базується на забезпеченні доступності та якості пересувань для всіх категорій користувачів.

Аналіз показує, що впровадження принципів сталої мобільності в Україні характеризується нерівномірністю та значною залежністю від залучення міжнародної технічної експертизи (GIZ, SECO, KfW) [36]. Встановлено, що ключовим бар'єром на інституційному рівні залишається відсутність законодавчого закріплення SUMP як обов'язкового містобудівного документа. Це надає процесу впровадження ініціативного характеру, де успіх залежить від політичної волі муніципалітету.

Основними векторами інституційної інтеграції у досліджуваних містах є: створення профільних департаментів або робочих груп з питань мобільності (Львів, Житомир, Вінниця); гармонізація місцевих програм розвитку з принципами Vision Zero та кліматичними цілями ЄС; залучення громадськості на етапах стратегічного планування, що є вимогою методології Eltis [38].

Проведене дослідження дозволило систематизувати стан планування мобільності в Україні, розподіливши міста за рівнем інституційної готовності та стадіями імплементації стратегічних документів. На основі моніторингу ініціативи MobiliseYourCity [35] та проєктів «Інтегрований розвиток міст в Україні» (GIZ), встановлено ієрархічну структуру готовності муніципалітетів. Ключовим чинником успіху для міст-лідерів стала децентралізація, яка надала місцевим органам влади повноваження для реалізації комплексних та міждисциплінарних процесів.

Порівняльні показники сформовано за результатами узагальнення статистичних даних муніципальних програм розвитку транспорту, матеріалів проєктів GIZ, MobiliseYourCity, Dozor City Analytics [37] та власних розрахунків автора (табл. 1).

Таблиця 1 Ієрархія міст України за рівнем стратегічного планування мобільності на 2024-2026р.

Категорія	Місто	Статус (за MobiliseYourCity / GIZ)	Основні результати та підтримка
I. Лідери (SUMP Прийнято та впроваджується)	Житомир, Львів, Полтава, Вінниця, Чернівці	План прийнято; стадія активної імплементації заходів.	Підтримка BMZ (Німеччина) та SECO (Швейцарія). Реальні зміни у Modal Split.
II. Стратегічний рівень (Наявні концепції/програми)	Київ, Хмельницький, Харків	Відсутній єдиний SUMP, але діють галузеві концепції (Транспортна модель, Велоконцепція).	Фрагментарне впровадження окремих елементів ІТС та паркувальної політики.
III. Формування бази (Процес розробки/Аналіз)	Рівне, Івано-Франківськ, Тернопіль, Луцьк	Стадія збору даних, аудиту маршрутних мереж та розробки концептуальних засад.	Робота транспортних експертів, підготовка аналітичних звітів (напр. система "Dozor").

*Джерело: складено автором за даними 25–34, 35–38.

Аналіз технічного стану показує, що міста I категорії вже перейшли до автоматизованого управління трафіком. Натомість міста III категорії (зокрема Рівне) наразі формують «цифровий фундамент». Використання даних Dozor City Analytics (2024) у Рівному є критично важливим етапом, що дозволяє верифікувати реальні пасажиропотоки перед прийняттям стратегічних рішень, що відповідає європейським стандартам доказового планування.

Зіставлення рівнів ієрархії з технічними параметрами транспортних систем дозволило виявити тенденцію взаємозв'язку між наявністю затвердженого Плану сталої міської мобільності та показниками якості мобільності (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика параметрів мобільності за категоріями міст

Категорія міст	Середня автомобілізація (авто/1000 нас.)	Частка ГТ (Modal Split, %)	Частка вело/мікромоб., %	Якість мобільності (за індикаторами SUMI)
I. Лідери	240–280	32–35%	7–12%	Висока (прогнозованість ГТ, розвинена веломережа).
II. Стратегічний рівень	350–410	28–38%	3–12%	Середня (конфлікт між автоцентричністю та еко-ініціативами).
III. Формування бази (Рівне)	230–260	30%	5%	Задовільна (високий потенціал ГТ, але дефіцит зв'язності мережі).

*Джерело: складено автором за даними [7–11, 18–24, 35–37]

Результати аналізу свідчать, що виявлена залежність Modal Split від категорії міста підтверджує концептуальну тезу П. Горбачова та С. Свічинського про обмеженість інфраструктурних рішень за відсутності стратегічного планування. У містах-лідерах інтеграція ПСММ у муніципальну політику забезпечує вдвічі вищі показники активної мобільності, тоді як специфіка міст III категорії, зокрема Рівного, вказує на наявність потужного інерційного базису у вигляді 30% частки громадського транспорту та потенціалу мікромобільності. За таких умов використання аналітичних платформ типу «Dozor» стає критичним технічним містком, що дозволяє місту трансформувати первинні дані у стратегічні рішення, минаючи тривалі етапи формування бази. Таким чином, перехід до вищих категорій мобільності для таких міст є питанням не стільки фізичної перебудови мережі, скільки інституційної формалізації наявних транспортних зв'язків та щільності пересувань.

Таким чином, формування "цифрового фундаменту" є невід'ємним початковим етапом для міст III категорії, оскільки воно забезпечує необхідні дані для якісного планування. Виявлена різниця між технічним станом автоматизованого управління трафіком у містах-лідерах та процесом збору аналітики у містах, що лише формують свою базу, чітко корелює із загальною стадією імплементації SUMP. Географічний та стратегічний розподіл українських міст за рівнем їхньої готовності до впровадження принципів сталої мобільності наочно представлено на рисунку 1.



Рисунок 1. Карта імплементації SUMP у містах України (2024–2026 рр.)

Лідери — міста Львів, Житомир, Вінниця, Чернівці, Полтава вже пройшли етап планування і активно змінюють інфраструктуру. Географічно ми бачимо значний кластер на Заході та в Центрі, що корелює з тривалою співпрацею з міжнародними донорами (GIZ, SECO).

Стратегічний рівень — міста Київ, Харків та Хмельницький мають потужний потенціал та окремі якісні рішення (наприклад, велоконцепції), але ще не об'єднали їх у єдиний, інтегрований SUMP. Це міста з високим рівнем автомобілізації, які потребують системного підходу.

Формування бази — міста Рівне, Івано-Франківськ, Тернопіль, Луцьк, Дніпро наразі перебувають на етапі збору даних та аудиту. Для них важливим є створення «цифрового фундаменту» (як-от GPS-аналітика Dozog у Рівному), щоб приймати рішення на основі реальних пасажиропотоків.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Отримані результати підтверджують, що впровадження Планів сталої міської мобільності є визначальним чинником переходу від традиційної автоцентричної моделі розвитку до інтегрованого управління міською мобільністю. Встановлена залежність між рівнем інституційної готовності муніципалітетів та показниками якості мобільності свідчить, що саме наявність стратегічного планування забезпечує формування збалансованого модального розподілу та підвищення ефективності функціонування транспортної системи.

Порівняння міст різних рівнів імплементації SUMP показало, що системний підхід до планування дозволяє підвищити ефективність використання існуючої інфраструктури без суттєвого збільшення її фізичних параметрів. Це підтверджує доцільність переходу від інженерно-орієнтованої моделі розвитку, заснованої на розширенні дорожньої мережі, до комплексного управління мобільністю, яке враховує взаємодію транспортного, містобудівного та соціально-економічного планування.

Важливим результатом дослідження є встановлення ролі інституційних факторів у забезпеченні ефективності стратегій сталої мобільності. Доведено, що наявність затверджених програм розвитку, міжвідомча координація та участь громадськості істотно підвищують результативність впровадження SUMP. Водночас для більшості міст України характерними

залишаються обмеження, пов'язані з недостатнім нормативно-правовим забезпеченням, фінансовими ресурсами та низьким рівнем інтеграції транспортного і містобудівного планування.

Окрему роль у формуванні обґрунтованих управлінських рішень відіграє використання цифрових інструментів аналізу транспортних потоків та систем моніторингу громадського транспорту. Отримані результати показують, що застосування аналітичних платформ дозволяє перейти до доказового планування та зменшує ризик прийняття неефективних інфраструктурних рішень, що особливо важливо для міст, які перебувають на початкових стадіях впровадження SUMP.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток методів транспортного моделювання для середніх міст України, інтеграцію інтелектуальних транспортних систем у процес управління мобільністю, а також на оцінювання довгострокового впливу реалізації Планів сталої міської мобільності на екологічні, соціальні та економічні показники розвитку міського середовища.

ВИСНОВКИ.

У результаті проведених досліджень виконано системний аналіз стану впровадження Планів сталої міської мобільності у містах України та оцінено їх вплив на ефективність функціонування міських транспортних систем. Проведений компаративний аналіз дозволив встановити залежність між рівнем стратегічного планування мобільності та показниками якості транспортного обслуговування населення.

Встановлено, що міста, у яких реалізуються принципи Sustainable Urban Mobility Plan, характеризуються більш збалансованим модальним розподілом перевезень, стабільнішою роботою громадського транспорту та вищим рівнем доступності міського середовища. Результати аналізу показують, що ефективність реалізації стратегій сталої мобільності визначається не лише технічним станом транспортної інфраструктури, а передусім рівнем інституційної готовності муніципалітету та наявністю комплексного стратегічного планування.

У ході дослідження визначено ключові фактори успішного впровадження Планів сталої міської мобільності, до яких належать: наявність затвердженої стратегії розвитку мобільності, інституційна координація між органами управління, використання транспортного моделювання та цифрових систем аналізу даних, інтеграція транспортного і містобудівного планування, залучення міжнародної технічної та експертної підтримки.

Встановлено, що для більшості міст України основними бар'єрами залишаються недостатнє нормативно-правове забезпечення впровадження SUMP, обмежені фінансові ресурси та фрагментарний характер планування транспортного розвитку.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування концепції сталої міської мобільності як інструменту досягнення Цілі сталого розвитку 11 та можуть бути використані при розробленні стратегічних документів розвитку міст України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (дата звернення: 10.03.2026).
2. Sustainable Development Goal 11: Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. UN-Habitat. URL: <https://unhabitat.org/sdg-11-sustainable-development-goal-11> (дата звернення: 11.03.2026).
3. Banister D. Unsustainable Transport: City Transport in the New Century. London: Taylor & Francis, 2005. 244 p.
4. Urban Mobility Package. European Commission. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport-urban-transport/urban-mobility/urban-mobility-package_en (дата звернення: 12.03.2026).
5. Rupprecht S., Brand L., Böhler-Baedeker S. Guidelines for Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan. 2nd Edition. Rupprecht Consult, 2019. 184 p.
6. Dimitriou H. T., Gakenheimer R. Urban Transport Planning: A Retrospective and Prospective Review. New York: Routledge, 2011. 312 p.
7. Integrating Transport and Land Use Planning. OECD Publishing, 2018. URL: <https://www.itf-oecd.org/integrating-transport-land-use-planning> (дата звернення: 12.03.2026).
8. Sustainable Mobility for All (SuM4All). Global Roadmap of Action toward Sustainable Mobility. World Bank, 2019.
9. Gehl J. Cities for People. Washington: Island Press, 2010. 288 p.
10. Sustainable Urban Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities. GIZ, 2021.

11. Sustainable Urban Mobility Plan Guidelines. European Commission, 2019. URL: <https://www.eltis.org/mobility-plans/sump-guidelines> (дата звернення: 15.03.2026).
12. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80> (дата звернення: 15.03.2026).
13. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF> (дата звернення: 15.03.2026).
14. Закон України «Про автомобільний транспорт». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14>
15. (дата звернення: 15.03.2026).
16. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> (дата звернення: 15.03.2026).
17. Чередніченко О. Ю. Стратегічне планування сталої міської мобільності в системі управління розвитком міст. Економіка та управління. 2020. № 4. С. 15–22.
18. Нагорний Т. Є. Теоретико-методологічні засади формування систем громадського транспорту у великих містах. Містобудування та територіальне планування. 2019. Вип. 70. С. 45–54.
19. Доля В. К. Транспортне моделювання в системі управління пасажиропотоками. Науковий вісник ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2021. № 156. С. 112–119.
20. Давідіч М. Ю., Давідіч О. О. Оптимізація параметрів функціонування маршрутних мереж міського пасажирського транспорту. Транспортні системи та технології перевезень. 2022. Вип. 23. С. 88–95.
21. Грабовий І. В., Поліщук В. П. Роль інтелектуальних транспортних систем у забезпеченні безпеки дорожнього руху. Вісник Національного транспортного університету. 2020. № 46. С. 34–42.
22. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8> DOI: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8>.
23. Никончук В. М., Хітров І. О., Пашкевич С. М., Кристочук М. Є. Теорія та практика розвитку транспортної системи та об'єктів транспортної інфраструктури : монографія. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. 547 с.
24. Никончук В. М., Козак С. В. Реалізація принципів зеленої логістики в транспортно-логістичній діяльності підприємств. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2025. №1 (24). С. 319–326. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.17382>.
25. Приймак В. І. Пріоритети розвитку міського громадського транспорту в умовах реалізації Національної транспортної стратегії України. Наукові праці НДФІ. 2021. № 2. С. 77–85.
26. План сталої міської мобільності міста Львова. URL: <https://city-adm.lviv.ua/portal/transport/> (дата звернення: 15.03.2026).
27. План сталої міської мобільності м. Житомир. URL: <https://zt-rada.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
28. План сталої міської мобільності м. Вінниця. URL: <https://www.vmr.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
29. План сталої міської мобільності м. Полтава. URL: <https://rada-poltava.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
30. Концепція розвитку велосипедної інфраструктури м. Києва. URL: <https://kyivcity.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
31. Транспортна модель міста Харкова. URL: <https://city.kharkiv.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
32. Концепція інтегрованого розвитку міста Рівне до 2030 року. URL: <https://rivnerada.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
33. Стратегія розвитку м. Івано-Франківськ. URL: <https://www.mvk.if.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
34. Стратегія розвитку м. Тернопіль. URL: <https://ternopilcity.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
35. Стратегія розвитку м. Луцьк. URL: <https://www.lutskrada.gov.ua> (дата звернення: 15.03.2026).
36. MobiliseYourCity Global Monitor (2025). URL: <https://www.mobiliseyourcity.net> (дата звернення: 15.03.2026).

37. Integrated Urban Development in Ukraine II. GIZ, 2024. URL: <https://www.giz.de/en/worldwide/33618.html> (дата звернення: 15.03.2026).
38. Dozor City Analytics (2024). URL: <https://city.dozor.tech/ua/rivne/city> (дата звернення: 15.03.2026).

V. Nykonchuk. Implementation of sustainable urban mobility plans as a tool for achieving sustainable development goal 11 in cities of Ukraine

The existing body of research on the development of urban transport systems demonstrates a growing attention to the problem of ensuring sustainable mobility as one of the key factors of safety, environmental stability, and quality of life in modern cities. The increase in motorization levels, congestion of the street and road network, and the growth of traffic intensity lead to deterioration of traffic conditions, reduced efficiency of public transport, and increased negative environmental impact. In international practice, one of the most effective approaches to solving these problems is the implementation of the concept of sustainable urban mobility, which is realized through Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP).

This paper presents a systematic analysis of the implementation of Sustainable Urban Mobility Plans in Ukrainian cities with different levels of institutional readiness for the application of SUMP principles. The study is based on a comparative analysis of motorization indicators, modal split, the level of public transport development, and the state of strategic mobility planning. The results reveal a relationship between the existence of an approved sustainable mobility plan and the performance indicators of the urban transport system. It is shown that cities implementing SUMP principles are characterized by a more balanced modal split, a higher share of public transport, and better accessibility of the urban environment. The study identifies that the key factors for successful implementation of sustainable mobility plans include institutional readiness of the municipality, use of transport modeling and digital data analysis systems, integration of transport and urban planning, and involvement of international technical support. The obtained results deepen the understanding of the mechanisms for implementing the concept of sustainable urban mobility and can be used in the development of strategic planning documents for Ukrainian cities in accordance with the requirements of Sustainable Development Goal 11.

Keywords: sustainable urban mobility, SUMP, urban transport system, modal split, motorization, transport planning, intelligent transport systems, sustainable development, SDG 11.

НИКОНЧУК Вікторія Миколаївна, доктор економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>

Viktoriia NYKONCHUK, D. Sc (Economics), Professor, Dean of the Mechanical Institute, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/q4j8e727>

¹Олісевич М. С., ²Мурований І.С., ³Хомин Н. Я.¹Львівський національний університет ветеринарної медицини ім. С. З. Гжицького, Львів,²Луцький національний технічний університет, Луцьк,³Національний транспортний університет, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДОВОЛЕНОГО ПОПИТУ НА ПАРКУВАННЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ ЗАЛЕЖНО ВІД МІСТКОСТІ СТОЯНОК НА АВТОМОБІЛЬНІЙ МАГІСТРАЛІ

У статті розглядається проблема забезпечення умов відпочинку водіїв автомобільних транспортних засобів, які виконують міжміські й міжнародні перевезення. Екіпажі комерційного транспорту, виконуючи міжміські і міжнародні перевезення, повинні дотримуватись регламентів Європейського союзу 561/2006, з одного боку, а також правил паркування транспортних засобів обабіч автомагістралей. Для цього в Європі, в Україні зокрема, бракує місткості таких стоянок, які б забезпечили повноцінний відпочинок водіїв і охорону транспортних засобів та інші послуги. Переглянуто відомі методи обґрунтування місткості стоянок і виявлено їх недоліки, які полягають у використанні припущення, про лінійний характер залежності показників ефективності використання мережі стоянок від параметрів транспортного потоку. Для підвищення точності розрахунку було розроблено метод моделювання транспортних потоків, у якому є відома частка транспортних засобів, які мають бути поставлені на стоянку. Метод базується на імітаційному моделюванні на основі кліткових автоматів. Клітковий автомат використано в модифікованому вигляді. Модифікація полягає у тому, що застосовано двохвимірне поле з розміщеними на ньому клітинки з різними розмірами. Завдяки ітераційному процесу клітинки переміщуються у фіксованому полі, яке відображає відтинки магістралі, що досліджується, й виконує логічні маневри при дотриманні бажаної швидкості. Маневри є об'єктивно необхідними для кожного транспортного засобу. Розроблено алгоритм і комп'ютерну програму для імітаційного моделювання транспортного потоку й процесу паркування. Проведено експерименти для виявлення залежності коефіцієнтів заповнення стоянок і задоволення попиту на паркування від інтенсивності та щільності транспортного потоку при відомому його складі. З'ясовано нелінійний характер відповідних залежностей. Експерименти проводились також для збільшеної місткості автомобільних стоянок. Збільшення сумарної місткості стоянок не дає прямо-пропорційного ефекту задоволення попиту на паркування. Натомість отримано можливість обґрунтувати граничні умови, при яких стоянки працюють ефективно.

Ключові слова: транспортний потік, автомагістраль, місткість стоянки, імітаційне моделювання, кліткові автомати, заповнення стоянки.

ВСТУП

Водії автомобільних транспортних засобів, які виконують перевезення вантажів і пасажирів на міжміських і міжнародних маршрутах зобов'язані дотримуватись регламенту 561/2006 Євросоюзу стосовно тривалості роботи і відпочинку. Зокрема, нормується мінімальна тривалість міжзмінного і внутрішнього відпочинку, порушення яких приводить до штрафних санкцій. Для того, щоб цих регламентів дотримуватись, водії зобов'язані використовувати влаштовані стоянки з відповідною охороною та рівнем сервісу і не порушувати безпеки дорожнього руху. Мережа таких стоянок в країнах Європейського Союзу (ЄС) є досить розвинена [1]. Однак, і у цих країнах водії комерційного транспорту стикаються з проблемою браку місць для паркування, особливо у вечірній час, і на магістралях, що відносяться до Європейських транспортних коридорів. Тоді, коли Україна буде прийнята до ЄС, то ця проблема також стане актуальною для більшості українських перевізників. Вирішити її буде змога при обґрунтуванні мережі автостоянок. При цьому потрібно розуміти вплив таких факторів, як вартість земельних ділянок обабіч магістралі, щільність розташування стоянок на заданій території, місткість паркінгів, інтенсивність, склад і щільність транспортних потоків магістралей на прийняття проектних рішень. Складність обґрунтування полягає в тому, що у водіїв найчастіше відсутня інформація про вільні місця на автостоянках поблизу, а велика інтенсивність транспортних потоків не дає їм змоги прибути до запланованого місця відпочинку вчасно. Якщо таке трапляється, то пошук найближчої стоянки може перевищувати дозволений час, який був дозволений регламентом. З іншого боку, якщо водій завчасно припинить рух на маршруті з метою відпочинку, то частка марного простою транспортного засобу збільшиться, а продуктивність зменшиться.

Для того, щоб визначити параметри проекрованої мережі стоянок, було виконано мультиагентне моделювання, яке дає змогу визначити параметри транспортних потоків і виконати прогноз процесів паркування точніше.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Паркування вантажівок може стати серйозною проблемою безпеки, коли водій не має своєчасної інформації про те, де є вільні місця. Тоді водій повинен вирішити: продовжувати рух втомлений в пошуках вільних місць для паркування, або паркуватися з порушенням правил, наприклад, на узбіччях та з'їздах автомагістралі. Обидві ситуації створюють серйозну загрозу безпеці. За таких обставин, коли правоохоронці стикаються з вантажівками, припаркованими незаконно, вони можуть відчувати себе зобов'язаними розбудити водіїв, щоб вони перемістили свої транспортні засоби, тим самим змушуючи їх продовжувати рух (можливо, понад дозволена законом межу паркування), щоб знову шукати легальну стоянку. Також спостерігається втрата продуктивності та збільшення викидів палива в результаті додаткового часу, який водії витрачають на пошук вільних місць для зупинки.

Проблема забезпечення парко-місцями міжміського автотранспорту є достатньо широко розкрита в зарубіжній літературі, оскільки стоянка автомобілів в неустановлених місцях в Європейському Союзі є суворо заборонена і крається значними покараннями [2].

У замському паркуванні автомобільного транспорту слід розрізняти декілька частин загальної проблеми. Це, по-перше, короткотермінове і довготермінове паркування, а по-друге, паркування комерційного та особового транспорту. Фактори, що впливають на попит на комерційне паркування для вантажівок, включають кількість та відсоток вантажівок у потоці руху, відстань між стоянкою для вантажівок та основною магістраллю, відстань між сусідніми стоянками для вантажівок, або зоною відпочинку, а також зручності, що надаються на стоянці для вантажівок. Дослідження, проведені в американському штаті Вірджинія показують, що дефіцит парко-місць спостерігається не на усіх автомагістралях штату. Однак, на деяких магістралях, наприклад I-95, співвідношення попит/пропозиція досягає 1,6. Середній попит на комерційне паркування вантажівок на зупинках перевищувало пропозицію на 14-32%, на час проведення досліджень (2004 рік). Було зроблено прогноз, що в майбутньому, якщо не буде надано нових стоянок, то співвідношення попиту до пропозиції зросте приблизно до 1,62-1,70 у 2020 році (відсутність збільшення приблизно дорівнює 5-відсотковому збільшенню частки вантажівок). Зростання попиту пов'язують не тільки із збільшенням автомобіле-потоків, але й з вимогами до якості наданих послуг (комфорт відпочинку водіїв, наявність обслуговування, охорони автомобілів тощо). Якщо паркувальні майданчики для комерційних вантажівок не розширити, дуже ймовірно, що більше вантажівок буде припарковано на узбіччях, що прилягають до зон відпочинку [3].

При проектуванні мережі стоянок вантажного транспорту на практиці використання рекомендацій, сформованих теоретичними дослідженнями, невідомі. В Україні до цього часу використовують методику розрахунку, яка є аналогом розрахунку потужності придорожньої станції технічного обслуговування автомобілів у замській зоні. Розрахунок базується на низці нормативів [4]. Нормативи приймаються залежно від категорії дороги та відстані до найближчої станції технічного обслуговування і є сталими. Зокрема, такі показники, за якими вибираються норми площі стоянки, як частка вантажного автотранспорту, частка з'їздів автомобілів з дороги, є середніми сталими величинами. Такі ж величини, як бажана швидкість автомобілів у потоці, часові обмеження водіїв на прийняття рішень взагалі не враховуються. Не враховано також вплив рівня сервісу стоянки. Крім того, таку методику неможливо використати для обґрунтування мережі стоянок, оскільки в ній відсутній зв'язок між місцем розташування, потужністю і добовим розподілом попиту на паркування.

Відомі дослідження [5, 6] в яких використовується кореляційний аналіз параметрів стоянкових майданчиків та тих, що пов'язані з прилеглими дорогами (інтенсивність руху, технічна швидкість). Результати описують рекомендовану місткість паркування в аналізованому регіоні з точки зору кількості доступних стоянок для важких вантажівок, розміру додаткової експлуатаційної зони та наявності елементів безпеки (огорожі, освітлення, фізичний захист, моніторинг). Тісна кореляція існує між деякими параметрами (тип дороги поблизу, розмір площі та кількість місць для паркування). Однак в кореляційних зв'язках є значні відмінності в результатах між приватними та громадськими паркінгами. Також у згаданих публікаціях відсутні рекомендації щодо щільності мережі стоянок у вибраних регіонах.

У статті [1] розглядається проблема погіршення стану довкілля, зокрема рівня забруднення атмосфери довкола транспортних терміналів внаслідок утворення черг вантажівок до розвантаження і до місця паркування. Для того, щоб поєднати проблему зростання викидів і організацію руху вантажівок на терміналах автори використали симуляцію процесів в середовищі VISSIM. Хоча було відмічено, що симуляція процесів не дає достатньо точного результату, все ж було з'ясовано, що

кількість зайнятих парко-місць і, відповідно, рівень заповнення майданчика для паркування лінійно залежать від сумарного вантажопотоку на терміналі.

Кліткові автомати успішно застосовують для імітації та відтворення закономірностей в багатьох галузях, наприклад охороні довкілля [7], плануванні складських приміщень та контейнерних майданчиків, дослідження поведінки груп рухомих об'єктів [8], зокрема мобільних роботів [9]. Відомі також приклади вдалого застосування моделей кліткових автоматів для сучасних досліджень транспортних потоків, у тому числі з автономними транспортними засобами [10, 12, 20]. Для таких моделей характерно, що вони адекватно відображають процеси на макроскопічному рівні при конструюванні їх з достатньо великою кількістю агентів.

Результати попередніх досліджень показують, що відсоток важких вантажівок та конкретне землекористування впливають на рівень зайнятості стоянок [2]. Щодо часу пошуку паркування, ключовими предикторами є відстань до основних доріг та зайнятість у певних галузях промисловості. Ці результати дозволяють виявити гарячі точки для простою та пошуку паркування вантажівок, сприяючи цілеспрямованим втручанням, таким як оптимізація планування землекористування, покращення інфраструктури навколо основних доріг та розширення паркувальних можливостей у комерційних зонах.

На задоволення попиту у парко-місцях значний вплив має забезпечення водіїв інформацією про стан заповнення паркувальних майданчиків у найближчому довіллі, а також адекватність прийнятих водіями рішень. У роботі [12] представлено багатоагентну інформаційну систему для узгодженого управління паркувальними місцями в зонах відпочинку на дорогах. Ця система динамічно адаптується до уподобань та потреб водіїв вантажівок щодо запитів на паркування. Результати показують, що кількість незаконних паркувань зменшується, що призводить до підвищення безпеки дорожнього руху.

В інформаційній системі для інформування водіїв [13] описано використання технологій донесення оперативної інформації водіям для пошуку вільних парко-місць. Ефективність виявлення на кожне місце зазвичай перевищує 95%, що корелює із загальними розбіжностями в кількості зайнятих місць від ± 1 до ± 3 одиниць. Загалом система стійка до різних джерел спостережуваних факторів, зареєстрованих під час оцінювання. Однак, така інформаційна система не враховує, що інформація про вільні парко-місця є доступна багатьом водіям і є актуальною для тієї частини з них, які виконують поїздку і у найближчий час планують регламентований відпочинок. Хто з водіїв зможе скористатись наявною інформацією, залежить від інтенсивності транспортних потоків на мережі, крейсерської швидкості автомобілів, складу потоків і розподілу ресурсу робочого часу водіїв.

На даний час дослідниками докладено значних зусиль та технологічних розробок у сфері інтелектуального паркування для легкових автомобілів. Однак, технології паркування вантажівок відстають у розвитку та впровадженні [13]. У статті [5] наведено огляд поточного стану досліджень інтелектуального паркування вантажівок, включаючи пов'язані дослідження паркування міських пасажирських автомобілів.

Дослідження, викладене в статті [14] заповнює прогалину в знаннях про закономірності паркування вантажівок, зосереджуючись на інтелектуальних інформаційних системах паркування, моделях прогнозування даних та аналізі поведінки паркування. У цьому огляді також розглядаються нові рішення в інтелектуальних системах паркування. Однак, запропоновані підходи для вирішення проблеми не дають чіткого бачення перехідних процесів впровадження новітніх рішень. Крім того, представлені поточні проблеми, можливі рішення та майбутні напрямки досліджень.

На даний час проектування мережі стоянкових майданчиків на автомагістралях, зокрема вздовж транспортних коридорів Європи та Азії виконується нормативним методом. За цього щільність стоянок на трасі та їх місткість залежить від інтенсивності й складу транспортного потоку (частки вантажівок у потоці). Зокрема, в Європейському Союзі Згідно з переглянутими правилами Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T), країни-члени ЄС повинні забезпечити розвиток сертифікованих безпечних стоянок кожні 150 км на основній мережі до 31 грудня 2040 року [2]. Такі ж вимоги висуваються і до місця розташування стоянок для вантажівок. Вони повинні бути безпосередньо на мережі або в межах 3 км від з'їзду з неї, що матиме переваги для планування маршрутів. Однак, при цьому результати досліджень впливу інтенсивності, щільності транспортного потоку, часу доби та використання інформаційних технологій на місткість та розташування стоянок не досліджено комплексно. При розв'язанні проблеми дефіциту парко-місць необхідним є мультиагентний підхід до формування попиту на паркування.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою досліджень було виявити характер впливу параметрів транспортного потоку на автомагістралі на ступінь заповнення / дефіциту парко-місць на стоянках для вантажних автомобілів, а також рівня інформаційного забезпечення та характеру прийнятих рішень водіїв. Для досягнення даної мети виконано такі задачі: 1) розробити методику імітаційного моделювання процесу наповнення / звільнення стоянок; 2) провести імітацію керування транспортним засобом і міжзмінним відпочинком водіїв, які впродовж пікового навантаження перебувають на заданому відтинку магістральної мережі; 3) розробити рекомендації щодо впровадження отриманих результатів для вдосконалення розрахунку ємності автостоянок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ У ВИГЛЯДІ КЛІТКОВИХ АВТОМАТІВ

Моделювання процесу паркування виконано з допомогою двохвимірних, модифікованих кліткових автоматів з двохнаправленим рухом транспортних засобів. Від класичних відомих моделей ми перейняли основні принципи її застосування:

- 1) на новий стан кожної клітини можуть вплинути тільки зовнішнє середовище;
- 2) система моделювання є однорідною: правила прийняття рішень є сталими в будь-якій області модельного відтинку магістралі; введено також крайові умови на початковий стан і кінцевий стан автомата;
- 3) скінченність множини можливих станів клітини – це умова, яка необхідна для отримання нового стану, щоб виконати кінцеву кількість операцій;
- 4) одночасний перехід в новий стан для всіх клітин – значення у всіх клітинах змінюються одночасно і одночасно, в кінці ітерації, а не в міру обчислення;
- 5) моделювання є дискретним: будь-яка якісна і кількісна зміна стану системи відбувається в дискретні моменти часу, які мають фіксовану періодичність – інтервал часу τ , який вважатимемо кроком моделювання [8, 9, 11].

Модифікація полягає у тому, що переміщення об'єктів моделювання вздовж і впоперек області кліткової решітки відбувається за особливими правилами. Щоб сформулювати ці правила, було прийнято такі допущення і умови. Розглядався відтінок автомобільної магістралі, вздовж якого може міститись 3 стоянки автомобілів з різною кількістю парко-місць. Оскільки, за нормами ЄС відстань між стоянками становить 15..30 км, то максимальна довжина модельного відтинку магістралі становила 120 км з трьома стоянками, які є рівновіддаленими на 30 км. Такий розмір модельного відтинку вибрано з тих міркувань, що максимальна інтенсивність транспортного потоку на міжміських дорогах в Україні становить $N = 2000$ автомобілів / добу, при трьох смугах руху в одному напрямі, і $N = 1300$ автомобілів / добу – при двох. Максимальна щільність потоку – $R=100..120$ автомобілів / км на одну смугу і у цьому потоці частка вантажного транспорту, якому потрібно зупинитись для короткотермінового (до 1 години), або довготермінового (понад 11 годин) відпочинку водіїв становить 8-12% [15]. Таким чином інтенсивність заїзду транспортних засобів (ТЗ) на стоянку становить $N_{park}=0,08..0,12N$, де N – сумарна інтенсивність транспортного потоку на кожному напрямку магістралі. Так обчислюється середнє фактичне наповнення автостоянок. Однак, при цьому не враховуються пікові параметри потоку і те, що середню потребу місць для відпочинку водіїв комерційного транспорту потрібно збільшити у тому випадку, якщо місткість зупинних майданчиків є меншою, ніж фактична потреба.

В роботі була сформульована і розв'язана така задача. Розглядалась автомагістраль, яка складається з 4 смуг руху, по дві в протилежних напрямках. Смуги є розділені подвійною горизонтальною розміткою типу 1.3 згідно з правилами дорожнього руху. В кожному напрямку є можливість транспортних засобів для обгону. З'їзд на стоянки обабіч дороги є можливим як в прямому, так і в зворотному напрямку магістралі. Виїзд з кожної стоянки на магістраль є теж дозволеним з обох сторін. Інтенсивність виїзду ТЗ зі стоянок $N_{drive} \approx 0,05N_{park}$ в піковий період.

ТЗ відображені в автоматі залежно від їх динамічних габаритів. Без суттєвого зниження точності, враховуючи, що довжина переміщення, яка має бути відображена моделюванням, є у декілька десятків разів більша, ніж довжина відтинку магістралі $L_{sum}=12000$ клітин (120000 м), а також мету цих досліджень, усі моделі учасників транспортного потоку тут розглядаються як однокліткові, двокліткові, або, максимально, – трикліткові, що відповідає динамічним габаритам транспортних засобів, відповідно, 10, 20, 30 м. На магістральних міжміських дорогах ці габарити вимірюються реально в інтервалі від 7,5 до 29 ± 2 м. Оскільки довжину однієї клітинки автомата вибрано 10 м, а тривалість одної ітерації – 1 с, то переміщення об'єкта на одну клітинку відповідає

абсолютній швидкості відносно початку координат, точки А, 10 м/с. Початком координат в цій моделі є точка А, яка є справа відтинку магістралі, що розглядалась (рис. 1).

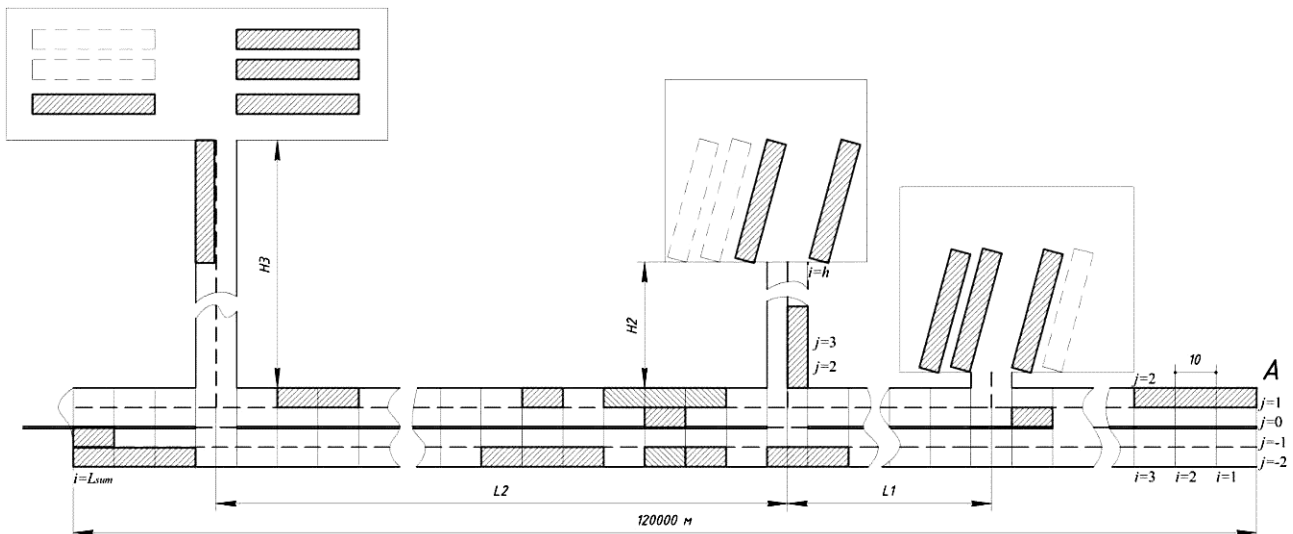


Рисунок 1 – Схема моделі кліткового автомату: L_{sum} – відтинку магістралі, що розглядається; $i=1..L_{sum}$ – номер клітини по горизонталі; $j=1..H_{max}$ (максимальна відстань від магістралі до стоянки); $l_1..l_3$ – відстань від початку координат моделі до заїзду на стоянку; $H_1..H_3$ – відстань від магістралі до стоянки

Кількість автомобілів, які в даному інтервалі часу перебувають на відтинку магістралі в прямому і зворотному напрямках, визначається з виразу:

$$Z_{sum} = R_t \cdot L_{sum}, \quad (1)$$

де R_t – щільність транспортного потоку у заданому інтервалі часу, в одному напрямку, на обох смугах, авт./км; L_{sum} – довжина відтинку магістралі, що розглядається, км.

Кожному ТЗ, який перебуває на магістралі впродовж одного кроку моделювання $\tau = 1$ с, присвоюється індекс $z = 1..Z_{sum}$. Сумарна кількість автомобілів, які перебувають на прямій смузі магістралі Z_{sum}^{dir} (рух від точки А – ліворуч), і сумарна кількість автомобілів на зустрічній смузі Z_{sum}^{rew} – випадкові величини з наперед відомим розподілом. До множини автомобілів, які обчислюються за виразом (1), не входять ті, які перебувають на стоянках, які розташовані обабіч заданого відтинку магістралі. ТЗ, які мають довготермінову стоянку для відпочинку водіїв можуть залишати стоянку впродовж часу моделювання T і виїжджати на магістраль на пряму, або зворотну смугу. Кількість таких автомобілів, що залишають стоянку в за одиницю часу, приймають на практиці, як частку від інтенсивності заїзду на стоянку [3].

Якщо автомобіль хоча б частково виходить за межі заданого відтинку магістралі впродовж кроку τ , то він втрачає ідентифікацію, наступний розгляд, та відповідний індекс z . Цей індекс стає резервним і присвоюється наступному ТЗ, який в'їжджає на відтинку магістралі в наступному кроці моделювання $\tau+1$. Якщо резервного індексу немає (усі Z_{sum} впродовж τ і $\tau+1$ кроку моделювання перебувають на відтинку магістралі), то додатковий автомобіль не може в'їхати на відтинку ні справа, ні зліва початку координат. Автомобілі, які заїжджають на будь-яку стоянку в межах відтинку, також вилучаються з множини клітин моделі. Виїзд автомобілів зі стоянок відбувається зі значно нижчою інтенсивністю, ніж в'їзд. Таким чином середній параметр щільності потоку упродовж заданого часу коливається. Щільність потоку змінюється вздовж магістралі через випадковий розподіл бажаних та дійсних швидкостей і через різний склад транспортного потоку, та через різні динамічні габарити. На початкових кроках імітації усі автомобілі на прямих і зустрічних смугах перебувають в максимально щільному потоці. Далі цей потік розсосереджується і набуває ознак стаціонарності. Вздовж відтинку магістралі є 12000 клітинок. Впоперек є стільки клітинок, скільки є смуг на магістралі, плюс кількість клітинок, що відповідає відстані від краю магістралі до найбільш віддаленої стоянки. Клітини вздовж магістралі мають індекси $i=1,2,...,12000$. Клітини впоперек магістралі мають індекси $j=-2, -1, 0, 1, \dots, H_{max} / -H_{max}$, де H_{max} – максимальна відстань від осі магістралі до найбільш віддаленої стоянки. Вісь магістралі має індекс $j=0$. Таким чином індекс клітин першої смуги в прямому напрямку є $j=2$. Стоянки вантажівок мають бути розташовані вздовж

магістралі так, щоб задовольнити попит паркування. Відомо, що інтенсивність транспортного потоку має вплив на такий попит [16, 17]. Однак, ця залежність має, насправді, складний, нелінійний характер. Так, кожен водій комерційного автомобіля, вибираючи місце паркування для довготермінового добового відпочинку, намагається використати робочий час максимально, свідомо користуючись критерієм:

$$t_{\min}^{park} - t_{\min}^{rest} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $t_{\min}^{park}$ – час руху до найближчої стоянки, год.; $t_{\min}^{rest}$ – мінімальний резерв часу, впродовж якого водій може керувати транспортним засобом.

Прагнучи заощадити робочий час, водій ризикує порушити регламенти праці й відпочинку ЄС 561/2006, якщо найближча стоянка виявиться без вільних місць. Крім того час $t_{\min}^{park}$ є величиною випадковою, яка залежить не тільки від бажаної середньої швидкості ТЗ, а й від інтенсивності, щільності й складу транспортного потоку. Оскільки щільність потоку є змінною вздовж відтинку магістралі 120 км, то водій може не досягнути бажаної швидкості, і не встигнути запаркуватись, навіть якщо вільні місця на найближчій стоянці є. Тому максимальна місткість кожної стоянки має бути обґрунтована шляхом моделювання вмотивованої поведінки усіх учасників дорожнього руху на відтинку L_{sum} . Максимальна місткість стоянок – це кількість трьохклітинних блоків (автомобіле-місць), що відображають автомобілі-тягачі з напівпричепом на стоянці. Рівень заповнення стоянки оцінюємо коефіцієнтом заповнення:

$$\eta_{park} = \frac{P_x}{P_{\max.x}}, \quad (3)$$

де P_x – кількість зайнятих парко-місць на стоянці x ; $P_{\max.x}$ – максимальна місткість x -ї стоянки. Мінімальний рівень задоволення попиту водіїв на вільні парко-місця для відпочинку:

$$\eta_{dem} = \frac{\sum (P_{\max.x} - P_x)}{N_{park}^{peak} \cdot \tau} \quad (3)$$

де N_{park}^{peak} – інтенсивність потоку вантажівок на паркування у піковий період, авт. / год.

На початку моделювання стоянки приймаємо заповненими на мінімальний рівень $\eta_{park}=0.3$. Впродовж доби цей рівень може зростати, зменшуватись, але досягне свого максимуму в піковий період, який, переважно, припадає на час 19⁰⁰-23⁰⁰ і може досягати цілковитої відсутності вільних парко-місць. Якщо $\eta_{park}=1$ для стоянки, до якої наблизився транспортний засіб, то він не займе парко-місце, а його водій змушений шукати іншу стоянку попереду маршруту. Якщо водій не знайде таку стоянку, то він вимушено порушить правила дорожнього руху і зупиниться в недозволеному місці. Таким чином, мінімальне значення коефіцієнта $\eta_{dem} = 0$, якщо вільних місць немає. Максимальне значення коефіцієнта $\eta_{dem} \geq 1$.

В сучасних умовах пошук парко-місця розпочинається водієм залежно від наявної інформації про наповненість найближчих стоянок. І тут можливі декілька випадків:

- 1) екіпаж вантажівки не володіє жодною інформацією про стан найближчих стоянок;
- 2) інформація про вільні місця на найближчих стоянках систематично надходить до водіїв;
- 3) водії автомобілів мають заброньовані місця для паркування, незалежно від тривалості їх подорожі.

Варіант 3 є детермінованим щодо вибору рішення і не приводить до жодної проблеми, крім витрат на бронювання, які можуть бути необґрунтовано великими через випадковий характер транспортного потоку. Так, якщо вільних парко-місць є більше, ніж потрібно для автомобілів, що вчасно зупинились без втрат робочого часу водіїв, то таке бронювання є недоцільним. Варіант 2 не є розповсюдженим в Україні й вимагає окремих досліджень. Тому нами було розглянуто варіант 1, який дає підстави для пошуку оптимальних рішень. Якщо водій не володіє жодною інформацією про вільні парко-місця, але дозволений час його руху за кермом є $t_{\min}^{rest}$, то він повинен дбати, щоб виконувалась нерівність:

$$t_{\min}^{rest} \leq t_{drive} + t_{arrive}, \quad (4)$$

де t_{drive} – тривалість керування ТЗ, год.; t_{arrive} – час, необхідний для прибуття до найближчої стоянки для відпочинку, год. В такому разі водій повинен зарезервувати багато часу, щоб встигнути вчасно припаркуватись. Цього часу може бути забагато, тому робочий час буде витрачатись непродуктивно.

Якщо інформація про вільні парко-місця надходить регулярно, то це ще не означає, що водій встигне зайняти вільне місце на стоянці. Для цього водієві потрібно добратись до зупинки до того моменту, коли інші транспортні засоби можуть там зайняти усі вільні місця. Водієві заважатиме наявний транспортний потік і те, що інші водії також прагнуть здійснити паркування. Власне, така ситуація потребує визначення, яке може бути доступним при виконанні комп'ютерної симуляції.

Автомобілі на магістралі підпорядковуються загальному потоку, однак мають власні пріоритети руху [18]. Кожен водій має бажану середню швидкість руху $V_{d,z}$, яка може трактуватись двома способами [19]:

1) швидкість руху має дорівнювати максимальній швидкості руху $V_{\max,z}$ на даній магістралі, яка дозволена даному транспортному засобу, і яку він зможе розвинути, враховуючи тягово-динамічні показники;

2) бажана швидкість руху $V_{d,z}$ є випадковою величиною, яка залежить від особистих суб'єктивних критеріїв вибору водія.

Оскільки у цих дослідженнях розглядались лише об'єктивні причини прийнятих рішень, тому дотримуємось способу розподілу швидкості (1).

Враховуючи названі передумови, було розроблено алгоритм імітації транспортного потоку і постановки на паркування транспортних засобів з використанням методики клітинних автоматів. Для розробленого алгоритму складена комп'ютерна програма мовою програмування *Derphi*, яка відрізняється від відомих програм мікромоделювання транспортного потоку акцентуванням уваги на вплив параметрів транспортного потоку на параметри мережі стоянок. Алгоритм складається з ініціалізації (кроку 0), та наступних циклічних кроків імітації й завершення моделювання за модельний час T (рис.2).

Крок 0. При ініціалізації початкових даних задають константи: T – тривалість імітації, приймається такою, при якій інтенсивність транспортного потоку в прямому N_{dir} і зворотному N_{rev} напрямках є приблизно сталою й відповідає піковому періоду використання автостоянок; t_{step} – тривалість кожного кроку моделювання (модельний час), с. Основна увага моделювання була відведена піковому навантаженню стоянок – інтервалу вечірнього часу тривалістю три години; максимальна допустима швидкість $T3$ для умов даної моделі становить 30 м/с – для легкових і вантажівок з повною масою до 3,5 тон, і 25 м/с – для вантажівок і автобусів з повною масою понад 3,5 тон. Мережа паркувальних майданчиків заданого відтинку магістралі описується трьома величинами: дистанціями між стоянками L_{p1}, L_{p2}, L_{p3} , номінальними місткостями стоянок P_1, P_2, P_3 , відстанями від магістралі до стоянки H_1, H_2, H_3 .

До величин, які генеруються випадковим чином на цьому кроці відносяться: R_{dir}, R_{rev} – щільність, відповідно, прямого і зворотного потоків на усіх чотирьох смугах магістралі. Щільність транспортного потоку вздовж магістралі є нерівномірною. Її величина залежить від динамічних габаритів автомобілів $typZ$, бажаних швидкостей автомобілів в потоці $V_{d,z}$, інтенсивності з'їзду автомобілів з магістралі для паркування N_{park} і виїзду зі стоянки N_{drive} , які також є випадковими масивами. Вважалось, що виїжджають зі стоянок у час пік ті автомобілі, які зупинялись для короткотермінового відпочинку водіїв. Генерується випадково також допустимий мінімальний час водіїв $t_{\min}^{rest}$, який вони мають щоб зупинитись на стоянці.

Після ініціалізації початкових даних обчислено загальну кількість автомобілів за виразом:

$$Z_{sum}^{dir} = R_{dir} \cdot N_{dir}, \quad (5)$$

$$Z_{sum}^{rev} = R_{rev} \cdot N_{rev}. \quad (6)$$

Загальна кількість автомобілів поділяється за трьома типами: $k=1$ – легкові; $k=2$ – мікроавтобуси і вантажівки класу N_1 , $k=3$ – N_2 , великовагові вантажівки класу N_3 і автобуси великого класу). Їх кількість визначаємо за виразами:

$$\text{для прямого напрямку, } Z_k^{dir} = Z_{sum}^{dir} \cdot g_k \quad (7)$$

$$\text{для зворотного напрямку магістралі, } Z_k^{rev} = Z_{sum}^{rev} \cdot g_k, \quad (8)$$

де g_k – випадкова величина, яка визначає частку $T3$ типу $k = 1, 2, 3$, які перебувають впродовж будь-якої миті з інтервалу T на даному відтинку магістралі.

На нульовому кроці моделювання усі отримані клітинки розміщують на початку прямих і зворотних смуг щільним потоком і вони отримують відповідні координати $X[step; z]$, $Y[step; z]$, а також тип $typZ[z]$, де $step$ – номер кроку моделювання, z – номер автомобіля, що відображений клітинкою на магістралі. Правила переходу заповнених клітинок залежать від подій, які обов'язково

відбуваються з на магістралі, якщо склались відповідні умови. Кількість таких подій – скінченна, однак, послідовність реалізації цих подій для усіх клітинок є обґрунтованою, виходячи з їх пріоритету та з умов безпеки руху.

Процедура 3. *Гальмування*. На нульовому кроці алгоритму усі ТЗ, які перебувають в рамках відтинку магістралі, мають однакову поточну швидкість і розташовані на початку кожної смуги з максимальною щільністю. Однак бажана швидкість гурту автомобілів на одній смузі є випадковою величиною, що характеризується законом розподілу Ерланга [20].

Тому перша клітинка в колоні на кожній смузі на нульовому кроці не застосовує процедури гальмування, оскільки попереду вона не має перешкод. Починаючи з другої і наступних клітин, які розташовані праворуч (на прямому напрямку), або ліворуч (на зворотному напрямку), від попередників, і мають бажану швидкість, яка є більшою, ніж у попередників, повинні зменшити швидкість, і бути переміщені ліворуч на таку кількість клітинок, яка відповідає швидкості їх попередника:

$$\Delta x[\text{step}, z] = Vd_{z-1} \cdot t_{\text{step}}, \quad (9)$$

де t_{step} – тривалість одного кроку моделювання, с.; Vd_{z-1} – швидкість попередника для z -го ТЗ, м/с.

Нова координата ТЗ дорівнюватиме:

$$x[\text{step}, z] := x[\text{step} + 1, z] + \Delta x. \quad (10)$$

Якщо бажана швидкість z -го ТЗ є меншою, ніж попередника, то гальмування не потрібне. При цьому сповільнення автомобіля повинно бути не більше, ніж допустиме j_{max} .

Автомобілі-лідери завжди мають пріоритет на дорозі, однак такі ТЗ є обмежені в інтенсивності гальмування. Тому, виконуючи процедуру гальмування, потрібно вимушено рекурсивно переміщати ліворуч усі заповнені клітинки, які стоять на шляху z -ї. Цю процедуру, виходячи з особливостей обчислення переміщень (9), потрібно виконувати за порядком координат зліва-направо.

Для усіх кроків $\text{step} \geq 1$, виконання процедури є аналогічним.

Процедура 4. *Прискорення*. Якщо фактична швидкість z -го ТЗ менша, ніж бажана, тобто $V[\text{step}; z] < Vd_z$, то йому потрібно розігнатись до цієї швидкості з прискоренням, яке допустиме для такого маневру, але не може перевищувати значення $j_{\text{max},z}$. Здійснити це можна, якщо попереду цього об'єкта є вільні клітинки. Після виконання прискорення об'єкт приймає таку швидкість залежно від того, досягнута бажана, чи ні, і чи є перешкода для виконання подальшого відносного руху. Якщо вільних клітинок попереду об'єкта, який розганяється, немає, то розгін не відбувається. Якщо вільних клітинок є стільки, що $(Vd_i - [V\text{step}; z]) \leq \Delta x_z$, де Δx_z є кількість вільних клітинок, то об'єкт набуває швидкості, що дорівнює швидкості попередника. Якщо $(Vd_i - [V\text{step}; z]) > \Delta x_z$, то об'єкт набуває бажаної швидкості.

Процедура 5. *Обгін, або зміна смуги руху*. Цей маневр моделюється в клітковому автоматі при наявності сприятливих умов, відсутності обмежень, і якщо є потреба збільшити швидкість $V[\text{step}; z]$ до бажаної. Обгін є допустимим при відсутності розділової суцільної лінії між смугами і якщо є хоча б одна паралельна смуга, по якій можна виконати маневр. Якщо є дві смуги в одному напрямку, то виконується перебудова в ліву смугу. Правила виконання обгону в цьому автоматі є такими ж. Прискорення об'єкта не повинно перевищувати допустиме максимальне j_{max} . Обгін розпочинається, якщо на паралельній смузі, на безпечній дистанції позаду відсутній ТЗ, що наближається. Обгін виконується, якщо перед об'єктом-попередником є не менше двох вільних клітинок; перевірка наявності вільних клітин виконується аналогічно як і для процедури розгону; при дотриманні усіх зазначених вимог обгін виконується автоматично, незалежно від можливої поведінки водія; після виконання обгону об'єкт набуває швидкості, яка дорівнює його бажаній, або швидкості попередника; процедура зміни смуги руху, або ж вертикальне переміщення клітинки в автоматі відрізняється від обгону тим, що потрібно обчислити кількість вільних клітинок позаду об'єкта і при відсутності перешкоди здійснювати маневр.

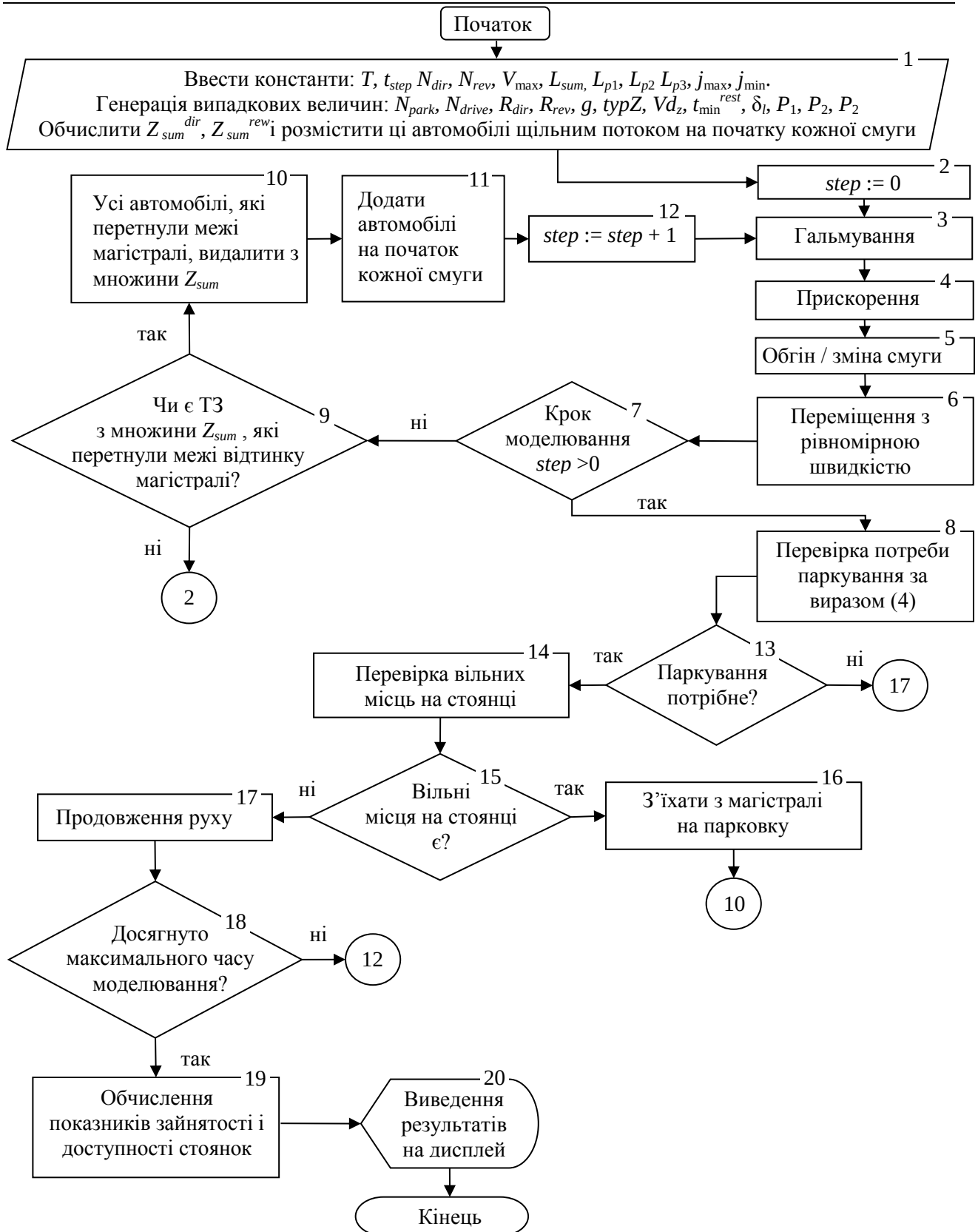


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання методом кліткових автоматів

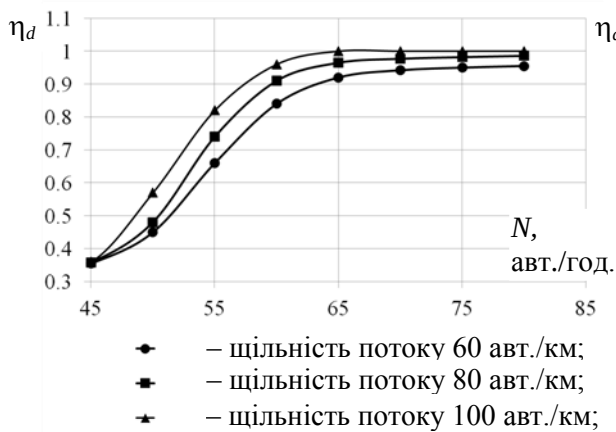
Процедура 6. *Переміщення зі сталою швидкістю* здійснюється, якщо ТЗ вже має бажану швидкість, або поточну швидкість, яка є менша, ніж швидкість попередника. У цьому випадку перевірка наявності вільних клітин не виконується. Переміщення вперед по відтинку магістралі здійснюється на кількість клітин $(V[step; z] - Vd_z) \cdot t_{step}$. Усі об'єкти, які слідують за z -м об'єктом, переміщуються також вперед магістралі на відповідну кількість клітин. Процедура виконується за аналогією з процедурою гальмування, тільки в зворотному напрямі, справа-ліворуч (прямий напрям).

Якщо крайній в кінці смуги ТЗ наблизився і перетнув межу відтинку магістралі, це перевіряється в процедурі 7 з прийняттям наступних рішень. Швидкість усіх переміщених вперед об'єктів дорівнює швидкості z -го. Якщо було виявлено хоча б один об'єкт, який перетнув межі відтинку попереду, то крок 0 на цьому завершується і алгоритм переходить до наступного кроку $step:=1$. На нульовому кроці обчислення показників використання автостоянок і задоволення попиту паркування не виконується. Таке обчислення відбувається з першого кроку циклічної ітерації.

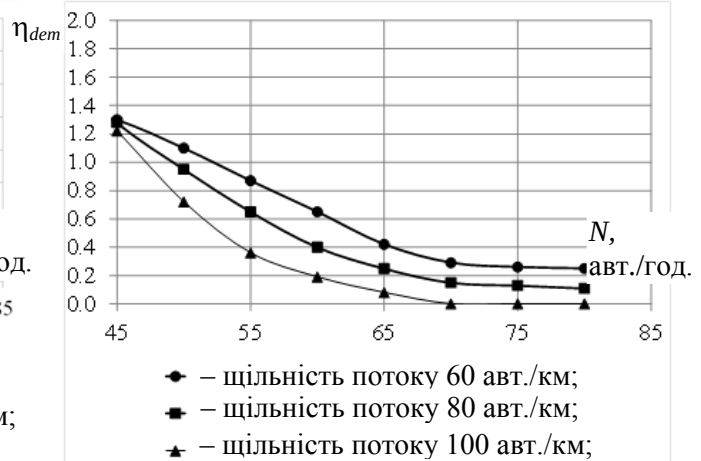
В алгоритмі є передбачені процедури перевірки і встановлення ТЗ на автостоянку. Перевірки полягає у виконанні умови (4), а також наявності вільних місць на трьох наявних стоянках відтинку. При виконанні постановки на стоянку ТЗ переміщається вертикально по координаті y_z в автоматі, відповідно до віддалі H_i від осі магістралі до стоянки. Тривалість такого переміщення враховується в часі t_{drive} . Алгоритм імітаційного моделювання триває до завершення модельного часу T . Алгоритм складається з вищеписаних процедур (див рис. 2) і реалізований у середовищі мови Delphi 10.2.

2. ПОКАЗНИКИ ЗАДОВОЛЕННЯ ПОПИТУ НА ПАРКУВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

Імітаційне моделювання виконувалось при змінних початкових умовах: сумарній інтенсивності транспортного потоку на прямому і зворотному напрямку магістралі $N = \{45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80\}$ авт./год., а також при змінній середній щільності транспортного потоку $R = \{60, 80, 100\}$ авт./км. В першій групі дослідів було проведено моделювання при наявності трьох стоянок на довжині відтинку магістралі 120 км із загальною місткістю 45 парко-місць (рис. 3). На отриманих даних накладено апроксимовані криві, які відображають залежність критеріїв функціонування стоянок від параметрів транспортного потоку.



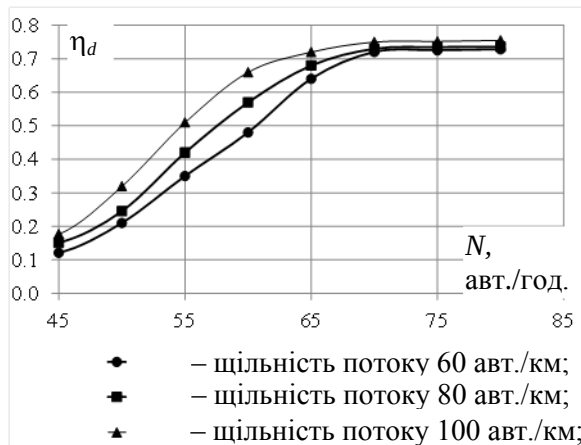
(а)



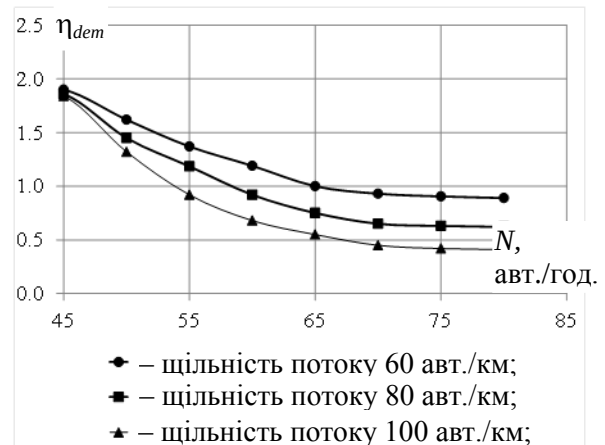
(б)

Рисунок 3 – Залежність показників заповнення автостоянки (а) і задоволення попиту на паркування (б) від параметрів потоку при сумарній місткості трьох стоянок 45 автомобіле-місць

У другій групі експериментів сумарну місткість автостоянок було збільшено до 60, тобто на 33% (рис. 4).



(а)



(б)

Рисунок 4 – Залежність показників заповнення автостоянки (а) і задоволення попиту на паркування (б) від параметрів потоку при сумарній місткості трьох стоянок 60 автомобіле-місць

Отримані залежності дають змогу виявити закономірності функціонування мережі стоянок і підвищити точність розрахунку їх місткості.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

З характеру зміни рівня заповнення автостоянки (див. рис. 3а, рис. 4а) в час пік на автомагістралі можна визначити такий характер залежності коефіцієнта η_d . При малих значеннях інтенсивності транспортного потоку заповнення стоянок збільшується повільно. Це пов'язано з невеликою чисельністю водіїв в потоці, яким потрібен довготривалий відпочинок. При зміні інтенсивності в інтервалі 50-70 авт./год. заповнення майданчиків для стоянки зростає стрімко через збільшення частки ТЗ з такими водіями. Так триває до того моменту, поки інтенсивність потоку досягає максимального значення при якому стоянки заповнюються максимально швидко і підвищення інтенсивності потоку унеможливило для багатьох водіїв здатність паркування. При умові низьких (до 50 авт./год.) і високих (понад 70 авт./год.) інтенсивностях потоку щільність потоку не має вирішального значення для заповнення стоянок (коефіцієнт η_d при зміні щільності коливається в межах 3-5%). При середніх значеннях інтенсивності слід зважати при виборі парко-місця й на щільність потоку. Це можна пояснити тим, що низька інтенсивність потоку є сприятливою для водіїв, щоб знайти вільну стоянку, а велика інтенсивність зумовлює дуже швидке заповнення усіх сусідніх стоянок, тому шанси водія зайняти вільне місце знижуються до мінімуму. До такого ж висновку приводить аналіз залежності задоволеного попиту на паркування (рис. 3б, рис. 4б). Коефіцієнт η_{dem} при збільшенні інтенсивності потоку знижується спочатку повільно, потім стрімко, далі асимптотично наближається до сталого значення, яке відображає заповнені автомобіле-стоянки. При максимальних значеннях інтенсивності лише 40% водіїв, які ведуть пошук парко-місць, можуть реалізувати таку потребу. Також можливі випадки, коли усі стоянки є зайняті й рівень задоволення попиту близький до 0 (місце знаходять тільки у випадку їх звільнення транспортними засобами, які виїжджають зі стоянки).

Нами було також проведено імітаційні експерименти при збільшенні місткості стоянок на 33%. Загальна тенденція функціонування стоянок не змінилась. Аналогічно коефіцієнт заповнення стрімко зростає при середніх значеннях інтенсивності потоку, а коефіцієнт задоволення попиту також нелінійно спадає. На відміну від першої групи дослідів було отримано більше вільних місць на стоянках навіть при значеннях інтенсивності до 60 авт./год. і щільності до 80 авт./км транспортного потоку. При сумарній місткості стоянок 45 автомобіле-місць повністю задоволений попит на паркування має місце лише до інтенсивності 50 авт./год. і такої ж щільності.

ВИСНОВКИ

Для підвищення точності розрахунку мережі автомобільних стоянок на автомагістралях в Україні потрібно брати до уваги, що водії мають дотримуватись регламентів ЄС 561/2006, не володіють інформацією про наявність вільних місць на автостоянках попереду маршруту, й не мають змоги бронювати такі місця. Для того, щоб водії не порушували правила безпечного паркування, мали змогу для короткотривалого і довготривалого відпочинку, потрібно удосконалити методи розрахунку параметрів мережі стоянок. Найбільш розповсюджений на даний час нормативний метод втратив актуальність, оскільки не враховує такі фактори розрахунку, як інтенсивність, густина та склад транспортного потоку, місткість і взаємне розташування стоянок вздовж магістралей.

Розроблений метод дослідження процесів паркування ТЗ показує, що залежність рівнів заповнення стоянок і задоволення попиту на паркування від параметрів транспортного потоку є нелінійною, на відміну від нормативів. Це дає змогу обґрунтувати граничні значення параметрів транспортних потоків, при яких проблема браку парко-місць буде вирішена.

Майбутні дослідження розширюють рамки застосування методу кліткових автоматів в сенсі розгляду більш ширшої мережі стоянок і обґрунтування місць їх розташування разом з місткістю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1.Link S., Plötz P. Geospatial truck parking locations data for Europe. *Data in brief*. 2024. Vol. 54. P. 110277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110277>
- 2.Merten L., Kuhnimhof T. The adequacy of residential parking requirements: a comparison of demand and required supply in European cities. *European Transport Research Review*. 2024. Vol. 16, no. 1. P. 59. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00682-w>

3. Garber N. J., Wang H. Estimation of the demand for commercial truck parking on interstate highways in Virginia. 2004. 44 p. URL : https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/20450/dot_20450_DS1.pdf
4. Павлюк В., Дембіцький В. Аналіз розподілу об'єму робіт дорожніх станцій технічного обслуговування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. Т. 2, № 19. С. 155-160. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.914>
5. Vital F., Ioannou P., Gupta A. Survey on intelligent truck parking: Issues and approaches. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2020. Vol. 13, no. 4, P. 31-44. URL: <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2926259>
6. Betkier I., Macioszek E. Characteristics of parking lots located along main roads in terms of cargo truck requirements: a case study of Poland. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 15720. URL: <https://doi.org/10.3390/su142315720>
7. Itami R. M. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. *Landscape and urban planning*, (1994). Vol. 30, no 1-2, P. 27-47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.173>
8. Павленко М. А., Руденко В. М., Захарченко І. В., Зінченко А. О., Чистов В. І. Метод дослідження поведінки груп рухомих об'єктів з використанням клітинних автоматів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. Вип. 3, № 67. С. 98-104. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.13>
9. Li W., Miao L., Yang P. Simulation analysis of robotic mobile fulfilment system based on cellular automata. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20, no. 3. P. 583-594. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-3-CO13>
10. Sun L., Cheng Z., Kong D., Xu Y., Wen S., Zhang K. Modeling and analysis of human-machine mixed traffic flow considering the influence of the trust level toward autonomous vehicles. *Simulation modelling practice and theory*. 2023. Vol. 125. P. 102741. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102741>
11. Shang X. C., Li X. G., Xie D. F., Jia B., Jiang R., Liu F. A data-driven two-lane traffic flow model based on cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2022. Vol. 588. P. 126531. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126531>
12. García J. F., Tomás V. R., García L. A., Martínez J. J. An autonomic system for intelligent truck parking. In *2014 11th international conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO)*, 2014, September, Setubal, Portugal. / Editors: Joaquim Filipe et al. IEEE. P. 810-816. URL: <https://doi.org/10.5220/0005149008100816>
13. Automated low-cost and real-time truck parking information system. Research report / Haghani A. et al., Maryland Dep. of Transp. November 2013. Project num. SP209B4M. 74 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26676/dot_26676_DS1.pdf
14. Duah N., Jiang S., Yadav O. P., Nguyen H. T., Earle-Young N. Navigating the truck parking challenge: A comprehensive review of strategies, emerging technologies, and future directions. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2025. Vol. 34. P. 101740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101740>
15. Горбачов П. Ф., Пронін С. В., Чижик В. М., Токмиленко Т. Дослідження пропускної спроможності смуги руху автомобільної дороги при русі без обгонів. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. Вип. 41. С. 33-40. URL: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.5>
16. Хом'як А. Я., Лісовод, Ю. А. Вивчення характеристики руху транспортних потоків. *Вісник Національного транспортного університету*. 2012. Вип. 26 № 1. С. 104-108. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_1_2013/104-108.pdf
17. Лановий О. Т., Кисельов В. Б., Кошарний О. М. Експериментальні дослідження характеристик транспортних потоків на автомобільних дорогах приміських зон міст України. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2023. Вип. 1 № 55. С. 167-178. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-167-178>
18. Дорошук В. О., Бережнюк І. А., Сліпенький, Є. Б. Організація дорожнього руху поза межами населених пунктів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11, № 42, ч. 1. С. 287-293. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.287-293](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.287-293)
19. Xiao R. I., Jaller M. Spatial analysis and predictive modeling framework of truck parking and idling impacts on environmental justice communities. *Journal of Transport Geography*. 2025. Vol. 127. P. 104263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104263>
20. Prokudin G., Olishevych M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. Vol. 4, no. 3. P. 6-14. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_4\(3\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_4(3)_2)

REFERENCES

- 1.Link, S., & Plötz, P. (2024). Geospatial truck parking locations data for Europe. *Data in brief*, 54, 110277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110277>
- 2.Merten, L., & Kuhnimhof, T. (2024). The adequacy of residential parking requirements: a comparison of demand and required supply in European cities. *European Transport Research Review*, 16(1), 59. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00682-w>
- 3.Garber, N. J., & Wang, H. (2004). Estimation of the demand for commercial truck parking on interstate highways in Virginia. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/20450/dot_20450_DS1.pdf
- 4.Павлюк, В., & Дембіцький, В. (2022). Аналіз розподілу об'єму робіт дорожніх станцій технічного обслуговування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(19), 155-160. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.914>
- 5.Vital, F., Ioannou, P., & Gupta, A. (2020). Survey on intelligent truck parking: Issues and approaches. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13(4), 31-44. URL: <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2926259>
- 6.Betkier, I., & Macioszek, E. (2022). Characteristics of parking lots located along main roads in terms of cargo truck requirements: a case study of Poland. *Sustainability*, 14(23), 15720. URL: <https://doi.org/10.3390/su142315720>
- 7.Itami, R. M. (1994). Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. *Landscape and urban planning*, 30(1-2), 27-47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.173>
- 8.Павленко, М. А., Руденко, В. М., Захарченко, І. В., Зінченко, А. О., & Чистов, В. І. (2021). Метод дослідження поведінки груп рухомих об'єктів з використанням клітинних автоматів. *Системи озброєння і військова техніка*, (3 (67)), 98-104. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.13>
- 9.Li, W., Miao, L., & Yang, P. (2021). Simulation analysis of robotic mobile fulfilment system based on cellular automata. *International Journal of Simulation Modelling*, 20(3), 583-594. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-3-CO13>
- 10.Sun, L., Cheng, Z., Kong, D., Xu, Y., Wen, S., & Zhang, K. (2023). Modeling and analysis of human-machine mixed traffic flow considering the influence of the trust level toward autonomous vehicles. *Simulation modelling practice and theory*, 125, 102741. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102741>
- 11.Shang, X. C., Li, X. G., Xie, D. F., Jia, B., Jiang, R., & Liu, F. (2022). A data-driven two-lane traffic flow model based on cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 588, 126531. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126531>
- 12.García J. F., Tomás V. R., García L. A., Martínez J. J. An autonomic system for intelligent truck parking. In *2014 11th international conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO)*, 2014, September, Setubal, Portugal. / Editors: Joaquim Filipe et al. IEEE. P. 810-816. URL: <https://doi.org/10.5220/0005149008100816>
- 13.Haghani, A., Farzinfard, S., Hamed, M., Ahdi, F., & Khandani, M. K. (2013). Automated low-cost and real-time truck parking information system. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26676/dot_26676_DS1.pdf
- 14.Duah, N., Jiang, S., Yadav, O. P., Nguyen, H. T., & Earle-Young, N. (2025). Navigating the truck parking challenge: A comprehensive review of strategies, emerging technologies, and future directions. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 34, 101740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101740>
- 15.Горбачов, П. Ф., Пронін, С. В., Чижик, В. М., & Токмиленко, Т. Т. (2023). Дослідження пропускнуої спроможності смуги руху автомобільної дороги при русі без обгонів. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, (41), 33-40. URL: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.5>
- 16.Хом'як, А. Я., & Лісовод, Ю. А. (2012). Вивчення характеристики руху транспортних потоків. *Вісник [Національного транспортного університету]*, (26 (1)), 104-108. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_1_2013/104-108.pdf
- 17.Лановий, О. Т., Кисельов, В. Б., & Кошарний, О. М. (2023). Експериментальні дослідження характеристик транспортних потоків на автомобільних дорогах приміських зон міст України. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Вип. 1 (55), С. 167-178. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-167-178>
- 18.Дорошук, В. О., Бережняк, І. А., & Сліпенький, Є. Б. (2025). Організація дорожнього руху поза межами населених пунктів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. І. С. 287-293. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.287-293](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.287-293)
- 19.Xiao, R. I., & Jaller, M. (2025). Spatial analysis and predictive modeling framework of truck parking and idling impacts on environmental justice communities. *Journal of Transport Geography*, 127, 104263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104263>

20.Prokudin, G., Olishevych, M., Chupaylenko, O., & Dudnik, O. (2019). Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, (4 (3)), 6-14. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_4\(3\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_4(3)_2)

M. Olishevych, I. Murovanyi, N. Khomyn. Research on the satisfied demand for truck parking depending on the location and capacity of parking lots on the highway

The article considers the problem of ensuring working and rest conditions for drivers of motor vehicles performing intercity and international transportation. Commercial transport crews, performing intercity and international transportation, must comply with the regulations of the European Union 561/2006, on the one hand, as well as the rules for parking vehicles on the sides of highways. To do this, the capacity of such parking lots in Europe, in Ukraine in particular, is lacking, which would ensure full rest for drivers and protection of vehicles. The known methods of substantiating the capacity of parking lots are reviewed and their shortcomings are identified, which consist in using the assumption of the linear nature of the dependence of the indicators of the efficiency of the use of the parking lot network on the parameters of the traffic flow. To increase the accuracy of the calculation, it was justified to use and develop a method for modeling traffic flows, in which there is a known share of vehicles that must be parked. The method is based on simulation modeling based on cellular automata. The cellular automata in these studies were used in a modified form. The modification consists in using a two-dimensional field with cells of different sizes placed on it. Thanks to the iterative process, the cells move in a fixed field that reflects the section of the highway under study and perform logical maneuvers while maintaining the desired speed. Maneuvers are objectively necessary for each vehicle. An algorithm and a computer program have been developed for simulation modeling of traffic and the parking process. Experiments have been conducted to identify the dependence of parking lot occupancy rates and parking demand satisfaction on the intensity and density of the traffic flow with a known composition. The nonlinear nature of the corresponding dependencies has been clarified. Experiments have also been conducted for increased parking lot capacity. Increasing the total parking lot capacity does not give a directly proportional effect on meeting parking demand. Instead, it has been possible to substantiate the boundary conditions under which parking lots operate efficiently.

Keywords: traffic flow, highway, parking capacity, simulation modeling, parking lot occupancy.

ОЛІСКЕВИЧ Мирослав Стефанович, доктор технічних наук, професор, Північний кампус Львівського національного університету ветеринарної медицини ім. С.З. Гжицького, м. Львів, Україна, e-mail: olishevychm@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6237-0785>

МУРОВАНИЙ Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, e-mail: igor_lntu@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

ХОМИН Назар Ярославович, аспірант Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: nazar.khomyn0037@gmail.com, <https://doi.org/10.23939/tt2025.02.033>

Myroslav OLISHEVYCH, Doctor of Technical Sciences, Professor, Northern Campus of the L'viv National University of Veterinary Medicine named after S.Z. Gzhytsky, Lviv, Ukraine, e-mail: olishevychm@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6237-0785>

Igor MUROVANYI, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, e-mail: igor_lntu@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

Nazar KHOMYN, Postgraduate Student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nazar.khomyn0037@gmail.com, <https://doi.org/10.23939/tt2025.02.033>

Дата надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

<https://doi.org/10.36910/2dwhv698>

Понтапльов І.О., Давідіч Ю.О.

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова***МЕТОД УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ ЯКОСТІ ПАСАЖИРСЬКОГО СЕРВІСУ НА МІСЬКИХ МАРШРУТАХ**

Робота присвячена розробці методу управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах. Якість послуг міського пасажирського транспорту визначає рівень життя мешканців населених пунктів. Аналіз результатів попередніх досліджень показав, що при оцінці якості перевезення пасажирів як показники використовувались параметри їх пересування. Існуючі методи оцінки рівня якості пасажирських транспортних послуг не дають змогу планувати якість. На теперішній час планування процесу перевезення пасажирів проводиться з використанням техніко-експлуатаційних показників роботи транспортних засобів. Ці показники доцільно використовувати для планування рівня якості пасажирського сервісу, що дасть можливість формувати перелік перевізників для маршрутів міста, які зможуть забезпечити досягнення планових значень параметрів процесу перевезень при використанні свого рухомого складу. Розглянуто важливість техніко-експлуатаційних показників як параметрів оцінки рівня якості пасажирського сервісу. Для формування переліку параметрів, які впливають на рівень пасажирського сервісу, було проведено опитування фахівців-перевізників. Наведені результати обробки натурних досліджень дозволили виявити параметри, які можна використовувати для оцінки рівня якості пасажирського сервісу. З використанням методу експертних оцінок визначено значущість техніко-експлуатаційних показників як показників якості з позицій фахівців-перевізників та їх коефіцієнти вагомості. Базуючись на отриманих їх значеннях було розроблено інтегрований показник оцінки рівня якості пасажирського сервісу на міських автобусних маршрутах. Як одиничні показники рівня якості пасажирського сервісу було використано такі техніко-експлуатаційні показники: технічна швидкість, інтервал руху, довжина перегону, коефіцієнт використання місткості, коефіцієнт регулярності руху. Проведені дослідження дозволили математично формалізувати зміну показників рівня якості пасажирського сервісу. Його використання дасть можливість встановлювати необхідні нормативи транспортним підприємствам при проведенні тендерів на міські маршрути. На підставі інтегрованого показника рівня якості пасажирського сервісу було розроблено метод управління її рівнем на міських маршрутах.

Ключові слова: якість, пасажир, обслуговування, маршрут, технічна швидкість, інтервал, довжина перегону, коефіцієнт використання місткості, коефіцієнту регулярності руху

ВСТУП

Визначення якості обслуговування при перевезенні пасажирів міськими маршрутами є важливим аспектом забезпечення ефективної роботи транспортної системи населених пунктів. Це особливо важливо в контексті зростання населення, урбанізації та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Планування та управління якістю обслуговування на міських маршрутах допомагає покращити доступність, комфорт, економічну ефективність та екологічну стійкість транспорту [1]. Європейський досвід показує, що впровадження сучасних технологій, систем збору даних та інтеграція транспортних послуг є ефективним. Однак забезпечення доступності та інтеграції інноваційних рішень залишається проблемою, що вимагає комплексного підходу до ефективного управління міським транспортом [2].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Якість обслуговування пасажирів є невід'ємною частиною сучасного рівня життя. Високоякісні послуги пасажирських перевезень можуть допомогти пасажирам скоротити час подорожі, збільшити час їхнього дозвілля, сприяти участі громадськості в усіх аспектах суспільного життя та сприяти більш комплексному вирішенню різних проблем, пов'язаних з життям людей. У процесі надання транспортних послуг якість обслуговування пасажирів є одним з основних стандартів організації перевезень [3]. Ефективна робота громадського транспорту безпосередньо впливає на комфорт, безпеку та швидкість перевезень пасажирів, а також на загальний рівень життя мешканців країни та екологічні умови урбанізованих територій. Наразі транспортні системи великих міст України загалом мають брак координації між перевізниками та споживачами (тобто міськими жителями). Це серйозно впливає на економічні вигоди та якість обслуговування міських пасажирських перевезень. Тому пріоритетними напрямками розвитку міських пасажирських перевезень є зміцнення методології управління транспортними підприємствами, удосконалення організації пасажирських перевезень та підвищення якості транспортних послуг [4]. У зв'язку з цим необхідно не лише покращувати

технічний стан транспортних засобів та підвищувати ефективність організації маршрутної мережі, але й проводити планування рівня обслуговування пасажирів та оцінку досягнутих результатів [5].

Вчені вважають, що лише шляхом визначення оціночних показників можна ефективно керувати рівнем якості перевезень. Однак сучасна транспортна наука не має чіткої структури цих показників, науковцями не проводилось систематичного аналізу та не визначалися рівні показників на різних щаблях управління транспортним процесом. Тому розробка системи показників якості пасажирських перевезень та проведення теоретичних досліджень щодо неї для оцінки рівня обслуговування міських мешканців є нагальною проблемою, яку необхідно вирішити [6]. Виходячи з того, що перевізник має необхідність планування перевезень, та враховуючи існуючу організаційну та функціональну структуру транспортного підприємства, можна сформулювати показники якості пасажирських перевезень. Існуючі транспортні підприємства зосереджуються на підвищенні економічної ефективності та максимізації прибутку. Водночас їм також необхідно подальше вдосконалення та забезпечення досягнення відповідного рівня якості за допомогою систематичних методів та нових технічних рішень [7]. У цьому випадку дослідники вважають, що слід враховувати основні вимоги до послуг транспортних підприємств [8]. Інші дослідники, спираючись на вітчизняний та міжнародний досвід, вважають, що найважливішими аспектами оцінки якості послуг є: стан навколишнього середовища (чистота салону, зовнішній вигляд транспортних засобів та обслуговуючого персоналу тощо) [9]; надійність (відсутність перерв або затримок рейсів) [9, 10]; почуття відповідальності (гарантія виконання послуг, готовність працівників допомагати споживачам) [9]; чесність (працівники володіють необхідними навичками та здібностями) [9]; комфорт (середовище та умови подорожі) [9, 11, 12, 13]; безпека (безризиковість) [9, 12, 14]; ввічливість (належна поведінка працівників) [9, 14, 15, 16]; соціальність (здатність працівників спілкуватися з пасажиром) [9]; взаєморозуміння (розуміння потреб пасажирів) [9, 17].

Дослідники запропонували багато методів оцінки якості обслуговування пасажирів на міських автобусних маршрутах. На ранніх етапах дослідження основним показником якості вважалося співвідношення часу подорожі при теоретично комфортних умовах до фактичного часу подорожі [18]. З розвитком наукової думки показники оцінки якості змістилися від одиничних до комплексних, що враховують кілька критеріїв [19]. Якість пасажирських перевезень – це багатовимірна категорія, що включає багато показників: регулярність руху, комфортність транспортних засобів, зручність подорожі для людей з обмеженими можливостями пересування, інформаційне забезпечення тощо [20]. Для об'єктивної оцінки рівня обслуговування міських автобусних маршрутів рекомендується застосовувати комплексний підхід, об'єднуючи всі аспекти якості в один показник. Він може слугувати ефективним інструментом для порівняльного аналізу маршрутів, прийняття управлінських рішень та планування заходів щодо покращення обслуговування пасажирів. Тим часом, існуючі методи оцінки рівня обслуговування пасажирських перевезень використовують параметри пересування пасажирів як її показники. Однак підприємства транспорту під час планування використовують інші параметри – техніко-експлуатаційні показники. Вони мають вирішальне значення для визначення рівня якості пасажирських перевезень. Їх використання для оцінки рівня якості пасажирського сервісу дозволить муніципальним органам управління встановлювати необхідні вимоги до підприємств транспорту під час проведення тендерів на міські маршрути. Якщо підприємство транспорту не може забезпечити потрібні значення техніко-експлуатаційних показників, необхідних для забезпечення бажаного рівня послуг пасажирських перевезень, тендерний договір на пасажирські перевезення може бути розірваний. Це дозволить провести новий тендерний конкурс для визначення підприємств, здатних забезпечити запланований рівень послуг пасажирських перевезень. Тому доцільно використовувати техніко-експлуатаційні показники для планування та оцінки рівня якості пасажирського сервісу.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка методу управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах для визначення значення якості в виробничих умовах під час планування технологічного процесу.

Для досягнення мети дослідження проводилося вирішення наступних завдань:

- виявлення техніко-експлуатаційні показників, що впливають на рівень якості пасажирського сервісу на міських маршрутах;
- визначення значущості техніко-експлуатаційні показників, як показників рівня якості;
- проведення математичної формалізації інтегрованого показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу;

- розробка методу управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Якість обслуговування пасажирів є невід'ємною частиною надання транспортних послуг. Для планування послуг з перевезення пасажирів перевізники (організатори транспортного процесу) використовують технічні та експлуатаційні показники транспортного процесу. Враховуючи різні характеристики кожного транспортного оператора, вони можуть використовувати різні методи оцінки якості обслуговування пасажирів. Перевізники класифікують усі показники якості за їхньою важливістю. Визначення значущості цих показників може бути досягнуто за результатами опитувань фахівців-перевізників. Для цього було використаний метод анкетування на основі заповнення спеціалізованих анкет. На першому етапі опитування було визначено техніко-експлуатаційні показники транспортного процесу, які можуть впливати на якість обслуговування пасажирів. На наступному етапі для зазначених техніко-експлуатаційних показників було визначено відсоткову частку від їх загальної кількості. Результати опитування фахівців-перевізників щодо техніко-експлуатаційних показників як показників рівня якості пасажирського сервісу представлено у табл. 1.

Таблиця 1- Результати опитування фахівців-перевізників щодо техніко-експлуатаційних показників, які можуть використовуватися для оцінювання рівня якості пасажирського сервісу

№	Техніко-експлуатаційні показники	Частка від загальної кількості вказаних техніко-експлуатаційних показників, %
1	Інтервал руху	94,3
2	Технічна швидкість	98,5
3	Коефіцієнт використання місткості транспортного засобу	78,3
4	Відношення місць для сидіння до місць для стояння	61,2
5	Довжина перегону	89,5
6	Кількість місць для сидіння	67,3
7	Швидкість сполучення	72,4
8	Місткість транспортного засобу	59,4
9	Час рейсу	55,3
10	Час простою на зупинках	51,2
11	Провізна спроможність	58,1
12	Кількість дверей транспортного засобу	49,4
13	Кількість транспортних засобів	54,2
14	Довжина маршруту	39,4
15	Кількість рейсів на маршруті	55,4
16	Коефіцієнт регулярності руху	75,6
17	Кількість зупинних пунктів на маршруті	44,7
18	Кількість днів роботи маршруту в році	42,3

На наступному етапі було проведено опитування фахівців-перевізників щодо значущості техніко-експлуатаційних показників як показників рівня якості пасажирського сервісу на міських автобусних маршрутах. Для цього було використано метод експертних оцінок [21]. У опитуванні прийняло участь 46 експертів. Далі проводилася обробка даних проведеного обстеження.

Серед всіх параметрів, що визначили фахівці-перевізники при проведенні обстеження, було обрано ті, що мають найбільшу значущість, та можуть використовуватись при плануванні технологічного процесу, а саме:

- технічна швидкість;
- інтервал руху;
- довжина перегону;
- коефіцієнт використання місткості;
- коефіцієнт регулярності руху.

Інтегрований показник рівня якості пасажирського сервісу можливо представити у наступному вигляді:

$$IP_{pc} = \prod_{i=1}^{K_n} OP_i^{B_i} \quad (1)$$

де K_n – кількість параметрів оцінки рівня якості пасажирського сервісу; $OP_i^{B_i}$ – рейтинг i -го показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу; B_i – коефіцієнт вагомості для i -го одиничного показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу.

У загальному вигляді рейтинг i -го показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу можна представити так:

$$OP_i = \frac{3_i^{\Pi}}{3_i^{\Phi}}, \quad (2)$$

де 3_i^{Π} – плановане значення i -го показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу; 3_i^{Φ} – фактичне значення i -го одиничного показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу.

На основі результатів опитування перевізників було визначено вагові коефіцієнти для показників рівня якості пасажирського сервісу, використовуючи рейтингові значення кожного показника за результатами проведеного опитування фахівців-перевізників [21]. Враховуючи, що найвище значення якості обслуговування пасажирів дорівнює 1, було визначено вагові коефіцієнти для всіх одиничних показників якості обслуговування. В результаті було отримано відповідні компоненти залежності (1).

Для показника «технічна швидкість»:

$$OP_{тш} = \left(\frac{3_{тш}^{\Phi}}{3_{тш}^{\Pi}} \right)^{0.333}, \quad (3)$$

де $3_{тш}^{\Pi}$ – планове значення технічної швидкості, км/год; $3_{тш}^{\Phi}$ – фактичне значення технічної швидкості, км/год; 0,333 – ваговий коефіцієнт показника «технічна швидкість».

Для показника «інтервал руху»:

$$OP_{ip} = \left(\frac{3_{ip}^{\Pi}}{3_{ip}^{\Phi}} \right)^{0.25}, \quad (4)$$

де 3_{ip}^{Π} – планове значення інтервалу руху, хв; 3_{ip}^{Φ} – фактичне значення інтервалу руху, хв; 0,25 – ваговий коефіцієнт показника «інтервал руху».

Для показника «довжина перегону»:

$$OP_{дп} = \left(\frac{3_{дп}^{\Pi}}{3_{дп}^{\Phi}} \right)^{0.167}, \quad (5)$$

де $3_{дп}^{\Pi}$ – планове значення довжини перегону, км; $3_{дп}^{\Phi}$ – фактичне значення довжини перегону, км; 0,167 – коефіцієнт вагомості показника «довжина перегону».

Для показника «коефіцієнт використання місткості»:

$$ОП_{КВМ} = \left(\frac{3_{КВМ}^П}{3_{КВМ}^Ф} \right)^{0.139}, \quad (6)$$

де $3_{КВМ}^П$ - планове значення коефіцієнту використання місткості автобусу; $3_{КВМ}^Ф$ - фактичне значення коефіцієнту використання місткості автобусу; 0,139 - коефіцієнт вагомості показника «коефіцієнт використання місткості».

Для показника «коефіцієнт регулярності руху»:

$$ОП_{КРР} = \left(\frac{3_{КРР}^П}{3_{КРР}^Ф} \right)^{0.111}, \quad (7)$$

де $3_{КРР}^П$ - планове значення коефіцієнту регулярності руху автобусів; $3_{КРР}^Ф$ - фактичне значення коефіцієнту регулярності руху автобусів; 0,111 - коефіцієнт вагомості показника «коефіцієнт регулярності руху».

Таким чином, використовуючи залежностей (3-7) як складові залежності (1), можна визначити рівень якості пасажирського сервісу на міському маршруті.

Покращення якості обслуговування пасажирів можливо за рахунок планування відповідних значень техніко-експлуатаційних показників. На підставі інтегрованого показника рівня якості пасажирського сервісу було розроблено метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах. Він включає такі етапи (рис. 1).

Крок 1. Формування вимог щодо рівня якості пасажирського сервісу на маршруті (планове значення інтегрованого показника рівня якості пасажирського сервісу, $ПП_{рс}^П$).

Крок 2. Доведення вимог щодо планового рівня якості перевезення пасажирів на маршруті до підприємства-перевізника.

Крок 3. Визначення з використанням залежностей (1), (3-7) значення планових техніко-експлуатаційних показників процесу перевезення пасажирів ($3_{ТШ}^П$, $3_{ІР}^П$, $3_{ДП}^П$, $3_{КВМ}^П$, $3_{КРР}^П$), що дають змогу досягти планового рівня якості пасажирського сервісу на маршруті ($ПП_{рс}^П$), та формування на їх підставі плану перевезень.

Крок 4. Проведення натурних обстежень під час виконання плану перевезень та визначення фактичних значень техніко-експлуатаційних показників перевезення пасажирів ($3_{ТШ}^Ф$, $3_{ІР}^Ф$, $3_{ДП}^Ф$, $3_{КВМ}^Ф$, $3_{КРР}^Ф$).

Крок 4. Визначення фактичного значення інтегрованого показника рівня якості пасажирського сервісу ($ПП_{рс}^Ф$) з використанням залежностей (1), (3-7).

Крок 5. Визначення виконання вимог щодо планового рівня якості перевезення пасажирів на маршруті ($ПП_{рс}^Ф \geq ПП_{рс}^П$).

Крок 6. Якщо якість відповідає вимогам ($ПП_{рс}^Ф \geq ПП_{рс}^П$), умови щодо якості перевезення пасажирів відповідають тендерним умовам.

Крок 7. Якщо якість не відповідає вимогам ($ПП_{рс}^Ф < ПП_{рс}^П$), умови щодо якості перевезення пасажирів не відповідають тендерним умовам. Внаслідок цього приймається рішення про доцільність розірвання тендерної угоди з підприємством-перевізником внаслідок її не виконання.

Таким чином, розроблений метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах дає змогу планувати рівень якості обслуговування мешканців міст шляхом укладення відповідних тендерних договорів з підприємствами-перевізниками, контролювати рівень його виконання та обґрунтовувати рішення щодо доцільності розірвання цих договорів при невиконанні їх умов.



Рисунок 1 – Метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому дослідженні пропонується метод побудови інтегрованого показника рівня якості пасажирського сервісу на міських автобусних маршрутах на основі об'єктивних техніко-експлуатаційних показників. Метод використовує як параметри технічну швидкість, інтервал руху, довжину перегону, коефіцієнт використання місткості, коефіцієнт регулярності руху. Ці параметри включені до аналізу, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність транспортних послуг та задоволеність пасажирів.

Ключовою особливістю запропонованого методу є те, що він враховує думки експертів транспортних підприємств щодо важливості кожного показника. Це не тільки забезпечує об'єктивність розрахунку, але й дає можливим його краще адаптувати до фактичної роботи міського транспорту. Застосована система зважування дозволяє побудувати інтегрований показник рівня якості пасажирського сервісу, який повністю відображає фактичну ситуацію з пасажирськими перевезеннями на маршруті.

Використання запропонованого методу може ефективно ідентифікувати фактичну ситуацію з обслуговуванням, забезпечити основу для управлінських рішень та динамічно відстежувати зміни в якості обслуговування. Отримані комплексні результати оцінки можуть служити аналітичним інструментом для підприємств-перевізників та місцевих органів влади для формулювання заходів щодо покращення якості транспортних послуг. Наданий в роботі метод може слугувати основою для

управлінських рішень, таких як оптимізація мережі маршрутів, коригування розкладів руху та покращення роботи транспортних операторів.

Таким чином, розроблений метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах забезпечує системний підхід до аналізу транспортних послуг та є ефективним інструментом для підвищення ефективності міських пасажирських перевезень.

ВИСНОВКИ

Існуючі методи оцінки рівня якості пасажирських перевезень не можливо використовувати при плануванні технологічного процесу внаслідок того, що вони як параметри використовують показники пересування пасажирів. Запропонована формалізація інтегрованого показника оцінки рівня якості пасажирського сервісу дозволяє як параметри використовувати техніко-експлуатаційні показники роботи транспортних засобів на маршруті. Це дає можливість його використання на етапі формування плану перевезень та у подальшому для контролювання досягнення запланованого рівня якості пасажирського сервісу. Запропонований метод управління рівнем якості пасажирського сервісу на міських маршрутах дає можливість проводити аудит виконання тендерних умов щодо якості перевезення пасажирів підприємствами транспорту. Його використання дозволить муніципальним органам влади формувати необхідні вимоги до транспортних компаній під час проведення тендерів на міські маршрути та контролювати їх виконання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ponkratov D. Public Transit Crowding Estimation Indicators: Comparative Analysis, Conditions of Application, Interaction / D. Ponkratov, Y. Davidich, D. Kopytkov, G. Samchuk, Y. Kush // *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, 536. - P. 764–774.
2. Вдовиченко В.О. Розвиток науково-технологічних основ взаємодії міського пасажирського транспорту в транспортно-пересадочних вузлах / В.О. Вдовиченко. Дисертація на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи (275 – транспортні технології). – Харків: ХНАДУ, 2019. – 472 с.
3. Ponkratov D., Kopytkov D., Davidich Y., Kush Y., Nykonchuk V. An estimation of the public transit quality of service based on travel fatigue modeling approach / D. Ponkratov, D. Kopytkov, Y. Davidich, Y. Kush, V. Nykonchuk // *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. vol. 1499, № 1. - P. 1-15.
4. Шапенко Є.М. Дослідження наявних проблеми організації міських пасажирських перевезень / Є.М. Шапенко, О.Д., Гульчак, О.Д. Котова, О.В. Білоног, В.В. Ярошевський // *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2023, вип. 2, № 4. - С 87-95.
5. Мороз М.М. Шляхи вдосконалення пасажирських перевезень транспортом загального користування / М.М. Мороз // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 2015, вип. 28. – С. 57 – 63.
6. Davidich Y. Assessment of Urban Public Service Levels / Y. Davidich, N. Gyulyev, Y. Royko, T. Schlosser, A. Kochina // *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, vol. 1. – P 58-68.
7. Борозенець М.І. Теоретико-методичні засади управління якістю послуг міського громадського транспорту / М.І. Борозенець. Дисертація на здобуття наук. ступ. докт. філ. за спеціальністю 281 “Публічне управління та адміністрування”. – Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2022. – 224 с.
8. Davidich N. Increasing Quality of Passenger Transport Service with the Help of Planning of Driver's Rational Working Schedule / A. Galkin, N. Davidich, Yu. Davidich, T. Grigorova, Ye. Kush, I. Tkachenko, A. Armen // *Transylvanian Review: Vol. XXV*, 2017, № 20. – P. 5179–5189.
9. Кашканов А.А. Оцінка якості автотранспортного обслуговування пасажирських перевезень в умовах нечітко визначених очікувань споживачів / А.А. Кашканов, Г.Г. Кашканова, І.Є. Стенжицька // *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк, 2010, вип. №28. – С. 80–85.
10. Amrapala C. Perceived Service Quality and Commuter Segmentation of Informal Public Transport Service in Bangkok, Thailand. / C. Amrapala, K. Chocharukul // *Eng. J.-Thail*, 2019, 23, - P. 1–18.
11. Wawryszczuk R. Methods of Passenger Ride Comfort Evaluation-Tests for Metro Cars / R. Wawryszczuk, E. Kardas-Cinal, J. Lejk, M. Sokołowski // *Sensors (Basel)*, 2023, vol. 23 (12):5741.
12. Yakovenko Y. Analysis of thermal comfort models of users of public urban and intercity transport / Y. Yakovenko, Y. Voichyshyn, O. Horbay // *UJMEMS*, 2022, vol. 8, № 2. –P. 67-74.
13. Zhou Z. Do passengers feel convenient when they transfer at the transportation hub? / Z. Zhou, M. Yang, L. Cheng, Y. Yuan, Z. Gan // *Travel Behav. Soc.*, 2022, 29. – P. 65–77.
14. Anikin N. Qualitative assessment of passenger service / N. Anikin, V. Terentyev, A. Andreev, A. Shemyakin, A. Martynushkin // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1614.

15. Jomnonkwao S. Methodologies for Determining the Service Quality of the Intercity Rail Service Based on Users' Perceptions and Expectations in Thailand / S. Jomnonkwao, T. Champahom, V. Ratanavaraha // *Sustainability*, 2020, 12(10).
16. Pantouvakis A. The role of onboard experiences cape and social interaction in the formation of ferry passengers' emotions / A. Pantouvakis, A. Gerou // *WMU J. Marit. Aff.*, 2023, 22. – P. 365–384.
17. Rotaris L. Corporate social responsibility and passengers' behavioral intentions: A case study on railway services / L. Rotaris, M. Scorrano, B. Campisi, P. Rossi // *Res. Transp. Bus. Manag.* 2023, 47, 100951.
18. Мельникова О. П. Модель оцінювання функціонування системи управління якістю на пасажирських автотранспортних підприємствах / О. П. Мельникова, Т. Є. Василенко // *Наукові праці ДонНТУ. – Серія: Економічні науки. – Донецьк : ДонНТУ, 2007. – С. 132– 138.*
19. Артюх, Т.М. Теоретичні основи товарознавства / Т.М. Артюх, І.В. Григоренко. - К.: НУХТ, 2014. - 263с.
20. Бажинова Т.О. Розробка системи показників якості легкових автомобілів. Автомобіль і електроніка / Т.О. Бажинова // *Сучасні технології*, 2016, 9. – С. 50-53
21. Okoli C. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications / C. Okoli, S.D. Pawlowski // *Information & Management*, 2004, 42(1). – P. 15-29.

REFERENCES

1. Ponkratov D., Davidich Y., Kopytkov D., Samchuk G., Kush Y. Public Transit Crowding Estimation Indicators: Comparative Analysis, Conditions of Application. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, 536, 764–774.
2. Vdovichenko V.O. Development of scientific and technological foundations of interaction of urban passenger transport in transport interchanges. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.01 - transport systems (275 - transport technologies). - Kharkiv: KhNADU, 2019. - 472 p.
3. Ponkratov D., Kopytkov D., Davidich Y., Kush Y., Nykonchuk V. An estimation of the public transit quality of service based on travel fatigue modeling approach. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499. № 1, 1-15.
4. Shapenko E.M., Gulchak O.D., Kotova O.D., Bilonog O.V., Yaroshevsky V.V. Research into existing problems of organizing urban passenger transportation. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Vol. 2, № 4, 2023, 87-95.
5. Moroz M.M. Ways to improve passenger transportation by public transport. Equipment in agricultural production, industrial engineering, automation. *Is*. 28, 2015, 57 – 63.
6. Davidich Y., Gyulyev N., Royko Y., Schlosser T., Kochina A. Assessment of Urban Public Service Levels. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, vol. 1, 58-68.
7. Borozenets M.I. Theoretical and methodological principles of quality management of urban public transport services. Dissertation for the degree of Doctor of Philology in specialty 281 “Public management and administration”. – Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2022, 224.
8. Davidich N., Galkin A., Davidich Y., Grigorova T., Kush Ye., Tkachenko I., Armen A. Increasing Quality of Passenger Transport Service with the Help of Planning of Driver's Rational Working Schedule. *Transylvanian Review*: Vol. XXV, 20, 2017, 5179–5189.
9. Kashkanov A.A., Kashkanova G.G., Stenzhytska I.E. Assessment of the quality of motor transport services of passenger transportation in the conditions of vaguely defined consumer expectations. *Interuniversity Collection "SCIENTIFIC NOTES"*. Lutsk, 2010, 28, 247.
10. Amrapala C., Chocharukul K. Perceived Service Quality and Commuter Segmentation of Informal Public Transport Service in Bangkok, Thailand. *Eng. J.-Thail*, 2019, 23, 1–18.
11. Wawryszczuk R., Kardas-Cinal E, Lejk J, Sokołowski M. Methods of Passenger Ride Comfort Evaluation-Tests for Metro Cars. *Sensors (Basel)*, 2023, 23 (12):5741.
12. Yakovenko Y., Voichyshyn Y., Horbay O. Analysis of thermal comfort models of users of public urban and intercity transport. *UJMEMS*, 2022, 8, 2, 67-74.
13. Zhou Z., Yang M., Cheng L., Yuan Y., Gan Z. Do passengers feel convenient when they transfer at the transportation hub? *Travel Behav. Soc*, 2022, 29, 65–77.
14. Anikin N., Terentyev V., Andreev A., Shemyakin A., Martynushkin A. Qualitative assessment of passenger service. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1614.
15. Jomnonkwao S., Champahom T., Ratanavaraha V. Methodologies for Determining the Service Quality of the Intercity Rail Service Based on Users' Perceptions and Expectations in Thailand. *Sustainability*, 2020, 12(10).
16. Pantouvakis A., Gerou A. The role of onboard experiences cape and social interaction in the formation of ferry passengers' emotions. *WMU J. Marit. Aff*, 2023, 22, 365–384.

17. Rotaris L., Scorrano M., Campisi B., Rossi P. Corporate social responsibility and passengers' behavioral intentions: A case study on railway services. *Res. Transp. Bus. Manag.* 2023, 47, 100951.
- 18 Melnikova O.P., Vasylenko T.E. Model for evaluating the functioning of the quality management system at passenger transport enterprises. *Scientific works of DonNTU, Series: Economic Sciences*, Donetsk: DonNTU, 2007, 132–138.
19. Artyukh T.M., Artyukh T.M., Grigorenko I.V. *Theoretical foundations of commodity science*. - Kyiv: NUHT, 2014, 263.
20. Bazhinova T.O. Development of a system of indicators of quality of passenger cars. *Automobile and electronics. Modern technologies*, 2016, 9, 50-53.
21. Okoli C., Pawlowski S.D. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management*, 2004, 42(1), 15-29.

Pontaplev I., Davidich Y. Method of managing the quality level of passenger service on urban routes

The paper presents method of managing the quality level of passenger service on urban routes. The quality of passenger transportation forms the standard of living of residents of settlements. The analysis of previous studies has shown that the parameters of their movement were used as indicators in assessing the quality of passenger transportation. Existing methods for assessing the quality of transportation do not allow planning its level. At present, the planning of the passenger transportation process is carried out using technical and operational indicators of vehicle operation. It is advisable to use these indicators for planning the quality of passenger service, which will make it possible to form a list of carriers for city routes that will be able to ensure the achievement of planned values of the parameters of the transportation process when using their rolling stock. The importance of technical and operational indicators as parameters for assessing the quality of passenger service is considered. To form a list of parameters that affect the level of passenger service, a survey of carrier specialists was conducted. The results of the processing of field studies allowed us to identify parameters that can be used to assess the quality of passenger service. Using the method of expert assessments, the significance of technical and operational indicators as quality indicators from the standpoint of transport specialists and their weight coefficients were determined. Based on the obtained values of weight coefficients, an integrated indicator of the level of passenger service quality assessment on city bus routes was developed. The following technical and operational indicators were used as unit indicators of the level of passenger service quality: technical speed, travel interval, route length, capacity utilization factor, traffic regularity factor. The conducted studies allowed mathematically formalizing the change in indicators of the level of passenger service quality. Its use will make it possible to establish the necessary standards for transport enterprises when conducting tenders for city routes. Based on the integrated indicator of the level of passenger service quality, a method of managing the level of passenger service quality on city routes was developed.

Keywords: quality, passenger, service, route, technical speed, interval, length of journey, capacity utilization factor, traffic regularity factor.

ПОНТАПЛЬОВ Іван Олександрович, аспірант, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, e-mail: i.pontaplev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-3321-9328>

ДАВІДІЧ Юрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, e-mail: davidich_tsl@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-4136-4084>.

Ivan PONTAPLOV, graduate student, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov, e-mail: i.pontaplev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-3321-9328>.

Yurii DAVIDICH, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov, e-mail: davidich_tsl@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-4136-4084>.

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/0phaaf32>

Придюк В.М., Самостян В.Р.
Луцький національний технічний університет

ЕФЕКТИВНЕ УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ПАСАЖИРСЬКИМИ АВТОТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕДОВИХ МЕТОДІВ ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ

У роботі розглянуто актуальні питання підвищення ефективності управління міськими пасажирськими автотранспортними потоками в умовах зростання урбанізації, інтенсифікації руху та підвищення вимог до якості транспортного обслуговування населення. Обґрунтовано необхідність застосування сучасних підходів до прогнозування пасажиропотоків як ключового елемента прийняття управлінських рішень у транспортних системах міст. Проаналізовано існуючі методи прогнозування, зокрема статистичні, економіко-математичні та інтелектуальні, серед яких особливу увагу приділено методам машинного навчання, нейронним мережам і гібридним моделям.

Визначено основні фактори, що впливають на формування та зміну пасажирських потоків, включаючи часові, просторові, соціально-економічні та інфраструктурні параметри. Запропоновано підхід до інтеграції результатів прогнозування у систему управління міським пасажирським транспортом, що дозволяє оптимізувати маршрути, інтервали руху, завантаженість транспортних засобів та зменшити експлуатаційні витрати перевізників. Розглянуто можливості використання цифрових технологій, інтелектуальних транспортних систем та автоматизованих систем диспетчеризації для підвищення адаптивності та оперативності управління.

Очікуваними результатами впровадження запропонованих рішень є підвищення ефективності функціонування транспортної системи міста, скорочення часу очікування пасажирів, зменшення перевантаження маршрутів та покращення екологічних показників. Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, транспортними підприємствами та науковцями для розробки стратегій розвитку міського транспорту на засадах сталості та інноваційності.

Ключові слова: транспортний потік, міські пасажирські перевезення, управління рухом, інтелектуальні транспортні системи, оптимізація маршрутів, ефективність перевезень, методи прогнозування, нейронні мережі, технології Big Data, гібридні моделі.

ВСТУП

Міські пасажирські перевезення відіграють ключову роль у забезпеченні мобільності населення, формуванні соціально-економічного потенціалу міст і підвищенні якості життя громадян. Зростання інтенсивності транспортних потоків, нерівномірність їх розподілу протягом доби, затори, екологічні проблеми та недостатня ефективність управління рухом транспорту є серйозними викликами для міської транспортної системи.

Проблема ефективного управління автотранспортними потоками на міських вулично-дорожніх мережах має не лише технічний, а й соціально-економічний характер. Рациональна організація руху дозволяє скоротити час у дорозі, зменшити витрати пального, підвищити безпеку перевезень і знизити рівень забруднення навколишнього середовища. Для цього важливим завданням є точне прогнозування транспортних потоків, що дозволяє оптимізувати рух, зменшити затори, підвищити безпеку та ефективність роботи дорожньої інфраструктури.

Передові методи прогнозування, зокрема штучні нейронні мережі, алгоритми машинного навчання, методи нечіткої логіки та моделювання на основі великих даних (Big Data), дають можливість з високою точністю передбачати зміни інтенсивності руху в різних часових і просторових масштабах.

Використання таких інноваційних підходів дозволяє транспортним організаціям і місцевим органам влади приймати обґрунтовані рішення щодо планування транспортної інфраструктури, розподілу потоків та удосконалення систем управління дорожнім рухом.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз наукових джерел свідчить, що проблема прогнозування автотранспортних потоків є однією з ключових у сфері транспортних технологій та інтелектуальних транспортних систем. Зростання рівня автомобілізації та ускладнення транспортних мереж зумовлюють необхідність підвищення точності прогнозування параметрів руху, таких як інтенсивність, швидкість і щільність транспортних потоків [2, 5]. Це є важливим для ефективного управління дорожнім рухом, зниження заторів і підвищення безпеки перевезень.

У науковій літературі методи прогнозування транспортних потоків умовно поділяються на кілька основних груп: наївні, параметричні (статистичні), імітаційні та непараметричні (методи

машинного навчання і глибинного навчання) [9]. Класичні статистичні методи, такі як моделі часових рядів (ARIMA), регресійні моделі та фільтр Калмана, широко застосовуються завдяки простоті реалізації та стабільності результатів [4, 6]. Водночас вони демонструють обмежену ефективність при моделюванні складних нелінійних і нестационарних процесів, характерних для сучасних транспортних систем [1].

Сучасні дослідження орієнтовані на використання методів машинного навчання та глибинного навчання, які здатні враховувати просторово-часові залежності транспортних потоків [7]. Зокрема, нейронні мережі (CNN, LSTM), випадкові ліси та байєсівські моделі забезпечують вищу точність прогнозування завдяки здатності працювати з великими обсягами даних та враховувати вплив зовнішніх факторів (погодні умови, події, дорожні роботи) [3, 10]. Особливу увагу приділяють графовим нейронним мережам, які дозволяють моделювати транспортну мережу як систему взаємопов'язаних елементів [11].

Разом з тим, аналіз літератури показує наявність низки невирішених проблем. По-перше, відсутня універсальна модель, яка б забезпечувала високу точність прогнозування в різних умовах транспортного середовища [1]. По-друге, існує проблема якості та повноти вхідних даних, зокрема даних з датчиків і GPS-пристроїв [1, 7]. По-третє, складність інтеграції різнорідних джерел даних та адаптації моделей до змінних умов руху обмежує практичне застосування існуючих підходів [5].

Таким чином, актуальним науковим завданням є розробка та вдосконалення методів прогнозування автотранспортних потоків на основі інтеграції класичних і інтелектуальних підходів, що забезпечить підвищення точності прогнозів та ефективності управління транспортними системами [8, 12].

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зростання інтенсивності автомобільного руху, збільшення кількості транспортних засобів і ускладнення дорожньої інфраструктури зумовлюють необхідність упровадження інноваційних підходів до управління автотранспортними потоками та їх прогнозування. Традиційні методи статистичного аналізу вже не забезпечують належної точності, оскільки не враховують усі динамічні фактори, що впливають на транспортну систему. У зв'язку з цим особливого значення набуває використання передових методів прогнозування, заснованих на сучасних технологіях обробки даних та інтелектуального аналізу інформації, саме тому основною задачею даного дослідження є впровадження таких методів для управління автотранспортними потоками та їх прогнозуванням [1,3].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході дослідження проблеми ефективного управління міськими пасажирськими автотранспортними потоками із використанням передових методів прогнозування отримано низку теоретичних і практичних результатів.

Насамперед встановлено, що традиційні підходи до управління транспортними потоками (на основі статичних розкладів і нормативних показників) не забезпечують належного рівня адаптивності в умовах динамічних змін попиту на перевезення. Виявлено, що ключовим фактором підвищення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту є використання прогнозних моделей, здатних враховувати часову, просторову та поведінкову варіативність пасажиропотоків.

У процесі дослідження обґрунтовано доцільність застосування сучасних методів прогнозування, зокрема: методів машинного навчання (регресійні моделі, дерева рішень, нейронні мережі), часових рядів (ARIMA, SARIMA) та гібридних моделей, що поєднують статистичні та інтелектуальні підходи. Проведений порівняльний аналіз показав, що гібридні моделі демонструють вищу точність прогнозування пасажиропотоків (на 10–25%) порівняно з класичними методами, особливо в умовах пікових навантажень та нерегулярних коливань попиту.

Розроблено концептуальну модель системи управління пасажирськими потоками, яка включає такі основні підсистеми: збір даних (GPS-моніторинг, валідатори, мобільні додатки), обробка та зберігання інформації, прогнозування попиту, оптимізація маршрутної мережі та оперативне управління рухом. Запропонована модель забезпечує інтеграцію інформаційних потоків у режимі реального часу та підтримку прийняття управлінських рішень.

Крім того, доведено ефективність застосування адаптивного розкладу руху, який формується на основі прогнозних значень пасажиропотоку. Такий підхід дозволяє гнучко змінювати інтервали руху транспортних засобів залежно від часу доби, дня тижня та сезонних факторів.

Пошук джерел проводився на основі офіційної технічної документації компаній ABB, KUKA, FANUC і Yaskawa, а також із використанням міжнародних стандартів, зокрема ISO 9283:2020. До

аналізу були залучені рецензовані наукові публікації, нормативні документи та офіційні технічні матеріали.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Автотранспортний потік – це сукупність транспортних засобів, що рухаються по певній ділянці дороги у заданому напрямку за певний проміжок часу. Його структура формується під впливом типів транспортних засобів (легкові, вантажні, автобуси, таксі), інтенсивності руху, швидкісних характеристик та умов дорожньої інфраструктури.

У контексті міських пасажирських перевезень ключове місце займають автобусні, тролейбусні, маршрутні та таксомоторні потоки. Їхнє узгоджене функціонування визначає загальну ефективність транспортної системи.

Показниками, що характеризують автотранспортний потік, представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Показники, що характеризують автотранспортний потік

№ з/п	Назва показника	Позначення	Одиниця виміру	Характеристика показника
1	Інтенсивність руху	q	авт/год	Кількість транспортних засобів, що проходять через переріз дороги за одиницю часу
2	Швидкість руху	v	км/год	Середня швидкість руху транспортного потоку
3	Щільність транспортного потоку	k	авт/км	Кількість автомобілів на одиницю довжини дороги
4	Склад транспортного потоку	–	%	Частка різних типів транспортних засобів у потоці
5	Інтервал руху	t	с	Час між проходженням двох послідовних автомобілів
6	Дистанція між транспортними засобами	l	м	Відстань між автомобілями в потоці
7	Пропускна здатність дороги	P	авт/год	Максимальна кількість ТЗ, що може пройти ділянку дороги
8	Рівень завантаження дороги	z	частка од.	Відношення інтенсивності до пропускної здатності
9	Режим руху	–	–	Характер руху (вільний, зв'язаний, насичений, заторний)
10	Нерівномірність руху	–	коэф.	Зміна інтенсивності руху в часі
11	Коефіцієнт варіації швидкості	Cv	частка од.	Ступінь неоднорідності швидкостей у потоці
12	Безпеківі показники	–	–	Характеризують рівень аварійності та ризику ДТП

На ефективність управління автотранспортними потоками при міських пасажирських перевезеннях впливають такі основні чинники: організація дорожнього руху, технічний стан дорожньої інфраструктури, планування маршрутної мережі пасажирського транспорту, вплив людського фактору, інформаційне забезпечення та управління.

При організації дорожнього руху недосконалість світлофорного регулювання, відсутність адаптивних систем управління, неузгодженість режимів руху призводять до транспортних заторів.

Технічний стан дорожньої інфраструктури, а саме наявність вузьких проїзних частин, обмеженої кількості смуг руху, поганий стан покриття значно знижують пропускну здатність доріг.

При плануванні маршрутної мережі пасажирського транспорту нераціональна схема маршрутів, дублювання ліній і невідповідність графіків руху пасажиропотокам призводять до перевантаження окремих напрямів і простоїв транспортних засобів.

Людський фактор деколи створює додаткові труднощі для організації ефективного потоку – недотримання водіями правил дорожнього руху, помилки в маневруванні, неправильне паркування.

Інформаційне забезпечення та управління суттєво впливає на ефективність управління автотранспортними потоками, а саме відсутність оперативного моніторингу транспортних потоків і єдиної диспетчерської системи ускладнює координацію роботи міського транспорту.

Сучасні підходи до управління автотранспортними потоками базуються на використанні інтелектуальних транспортних систем (ITS) - комплексу інформаційних, телекомунікаційних і керуючих технологій, що забезпечують ефективне, безпечне та екологічне функціонування транспорту. Використання інтелектуальних транспортних систем дозволяє у реальному часі аналізувати ситуацію на дорогах, прогнозувати затори та оптимізувати рух.

Підходи до управління автотранспортними потоками на основі ITS наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Сучасні підходи до управління автотранспортними потоками на основі ITS

№ з/п	Назва підходу / системи	Складові елементи	Призначення та характеристика
1	Адаптивне керування дорожнім рухом	Інтелектуальні світлофори, датчики	Регулювання руху в реальному часі, зменшення заторів
2	Системи моніторингу транспортних потоків	Камери, радары, GPS	Збір даних про інтенсивність, швидкість і щільність руху
3	Інформаційні системи для водіїв	Табло VMS, мобільні додатки	Інформування про дорожню ситуацію, маршрути, затори
4	Системи управління транспортними потоками (TMS)	Центри керування, програмне забезпечення	Координація руху транспорту та світлофорних об'єктів
5	Інтелектуальні системи паркування	Датчики, мобільні сервіси	Пошук і управління паркувальними місцями
6	Пріоритет громадського транспорту	Світлофорні контролери, GPS	Забезпечення безперешкодного руху громадського транспорту
7	Автоматизовані системи контролю	Камери фіксації, WIM-системи	Контроль швидкості, ваги та дотримання ПДР
8	Інтелектуальна логістика	Fleet Management Systems	Оптимізація маршрутів і управління автопарком
9	Системи V2I та V2V	Комунікаційні модулі	Обмін даними між транспортом і інфраструктурою
10	Використання штучного інтелекту та Big Data	Аналітичні платформи	Прогнозування транспортних потоків і оптимізація руху

ITS дозволяють перейти від статичного управління рухом до адаптивного, прогнозованого та інтегрованого управління транспортними потоками, що значно підвищує ефективність транспортної системи.

Для великих міст характерні складні транспортні схеми, що потребують багаторівневого управління.

Під багаторівневим управлінням автотранспортними потоками у великих містах мається на увазі організація керування дорожнім рухом на кількох взаємопов'язаних рівнях — від локального (окреме перехрестя) до стратегічного (вся транспортна система міста). Це дозволяє ефективно координувати складні транспортні процеси.

Рівні управління автотранспортними потоками у великих містах представлений у таблиці 3.

Таблиця 3 – Рівні управління автотранспортними потоками у великих містах

№ з/п	Рівень управління	Об'єкт управління	Основні функції
1	Локальний	Окреме перехрестя, ділянка дороги	Регулювання світлофорів, управління потоками на перехрестях
2	Координаційний	Група перехресть, магістраль	Узгодження роботи світлофорів (зелена хвиля), оптимізація руху на коридорах
3	Районний	Транспортна мережа району	Перерозподіл потоків, управління завантаженням доріг
4	Міський	Уся транспортна система міста	Централізоване управління рухом, моніторинг і реагування на затори
5	Регіональний	Приміські та	Координація міського та міжміського

		міжміські зв'язки	транспорт
6	Стратегічний (довгостроковий)	Транспортна система в цілому	Планування розвитку інфраструктури, впровадження ITS, транспортна політика

Багаторівневе управління – це ієрархічна система (рис. 1), яка дозволяє: оперативно реагувати на зміни (локальний рівень), оптимізувати рух у масштабі міста (міський рівень), планувати розвиток транспорту (стратегічний рівень).



Рисунок 1 – Ієрархічна система рівнів управління автотранспортними потоками у великих містах

Найбільш ефективним є комплексний підхід управління автотранспортними потоками для великих міст, який поєднує організаційні, технічні та інформаційні заходи.

Комплексна стратегія управління включає:

1. Моделювання транспортних потоків із використанням програм (VISSIM, TransCAD, Aimsun);

2. Визначення «вузьких місць» дорожньої мережі;

3. Впровадження системи пріоритету для громадського транспорту;

4. Використання систем відеоспостереження та контролю трафіку;

5. Розвиток концепції «розумного міста» (Smart City) у транспортній сфері.

Результатом застосування таких підходів є зниження транспортних заторів на 20–30%, покращення регулярності руху на 10–15% і скорочення середнього часу поїздки пасажирів.

Комплексна стратегія управління автотранспортними потоками для великих міст – це система взаємопов'язаних заходів, спрямованих на підвищення ефективності, безпеки та екологічності дорожнього руху, а саме:

1. Планування транспортної інфраструктури – розвиток і модернізація вулично-дорожньої мережі, будівництво розв'язок, об'їзних доріг, мостів, зонування міста з урахуванням транспортних потоків;

2. Інтелектуальні транспортні системи (ITS) – адаптивне керування світлофорами, системи моніторингу трафіку (камери, датчики), навігаційні сервіси для водіїв, автоматизоване управління дорожнім рухом у реальному часі;

3. Організація дорожнього руху – оптимізація схем руху (односторонні вулиці, виділені смуги), впровадження пріоритету для громадського транспорту, регулювання швидкісних режимів.

4. Розвиток громадського транспорту – підвищення якості та доступності перевезень, інтеграція різних видів транспорту (автобуси, трамваї, метро), впровадження електротранспорту;

5. Управління попитом на транспорт – платний в'їзд у центр міста, обмеження використання приватних авто, стимулювання карпулінгу та використання громадського транспорту;

6. Паркувальна політика – організація паркувальних зон і паркінгів, впровадження платного паркування, системи «Park & Ride»;

7. Екологічні заходи – зниження викидів (перехід на електротранспорт), створення «зелених зон», контроль за рівнем шуму та забруднення;

8. Безпека дорожнього руху – впровадження систем відеофіксації порушень, покращення дорожньої інфраструктури (розмітка, освітлення), освітні кампанії для водіїв і пішоходів;

9. Цифровізація та аналітика – використання Big Data для аналізу транспортних потоків, прогнозування заторів, мобільні додатки для користувачів транспорту;

10. Інституційне та нормативне забезпечення – координація між органами влади, розробка транспортної політики, залучення інвестицій і державно-приватного партнерства.

Підвищення ефективності управління автотранспортними потоками має значний економічний і соціальний ефект:

- зменшення часу перебування пасажирів у дорозі;
- зниження витрат на паливо та технічне обслуговування;
- скорочення рівня викидів шкідливих речовин;
- підвищення привабливості громадського транспорту;
- зростання якості транспортного обслуговування населення.

Таблиця 4 – Економічний і соціальний ефект від підвищення ефективності управління автотранспортними потоками

№ з/п	Група ефекту	Вид ефекту	Характеристика
1	Економічний	Зниження витрат пального	Оптимізація руху зменшує витрати пального та експлуатаційні витрати
2	Економічний	Зменшення часу перевезень	Скорочення простоїв і затримок у транспортному процесі
3	Економічний	Підвищення продуктивності транспорту	Ефективніше використання рухомого складу
4	Економічний	Зниження витрат на обслуговування	Менший знос транспортних засобів і дорожньої інфраструктури
5	Економічний	Зменшення логістичних витрат	Оптимізація маршрутів і транспортних потоків
6	Соціальний	Підвищення безпеки дорожнього руху	Зменшення кількості ДТП і травматизму
7	Соціальний	Зниження рівня стресу водіїв	Менше заторів і більш передбачуваний рух
8	Соціальний	Покращення якості обслуговування	Підвищення надійності та регулярності перевезень
9	Соціальний	Зменшення негативного впливу на довкілля	Зниження викидів шкідливих речовин і шуму
10	Соціальний	Підвищення мобільності населення	Краща доступність транспортних послуг
11	Соціально-економічний	Економія часу населення	Скорочення часу на поїздки
12	Соціально-економічний	Підвищення якості життя	Загальне покращення умов проживання в містах

Ефективне управління транспортними потоками дозволяє досягти економії ресурсів, підвищення безпеки та якості життя населення, що є ключовим для сталого розвитку транспортних систем.

Крім того, ефективне управління потоками сприяє формуванню позитивного іміджу міста, розвитку туристичної привабливості та підвищенню конкурентоспроможності регіону.

Одним із найперспективніших напрямів сучасних досліджень у сфері транспортного прогнозування є застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту. Нейронні мережі

дозволяють моделювати складні нелінійні залежності між параметрами дорожнього руху, враховуючи погодні умови, час доби, день тижня, інтенсивність руху, сезонність та інші чинники. Завдяки здатності до самонавчання такі моделі досягають високої точності прогнозів навіть у дуже складних і мінливих транспортних ситуаціях [4].

Широкого поширення набувають технології Big Data, які дозволяють аналізувати величезні масиви даних (GPS, датчики, історичні поїздки, погодні умови) і будувати найефективніші маршрути. Схема застосування технології Big Data у транспорті та логістиці представлена на рисунку 2.

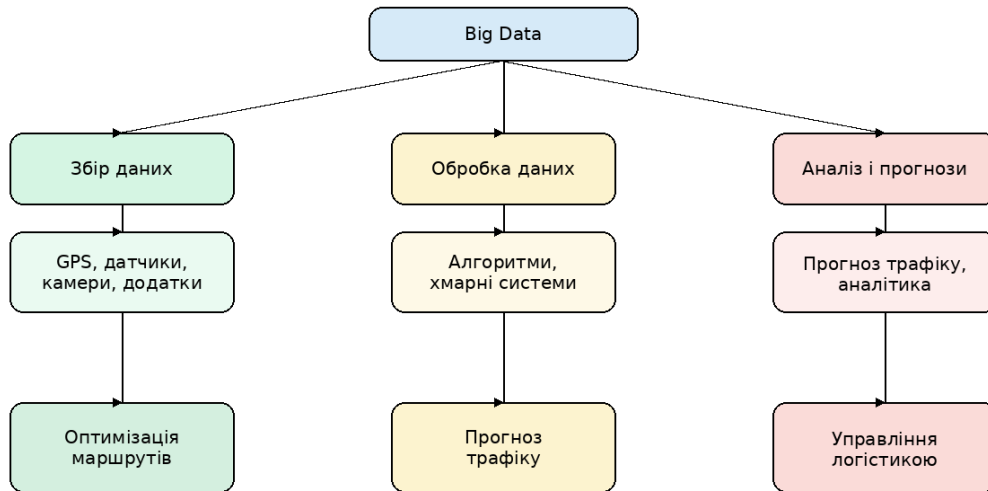


Рисунок 2 – Схема застосування технології Big Data у транспорті та логістиці

На рисунку 3 показана схема прогнозування автотранспортних потоків шляхом використання технологій BigData.



Рисунок 3 – Схема прогнозування автотранспортних потоків шляхом використання технологій BigData

Технології Big Data забезпечують обробку великих обсягів інформації, що надходить від систем відеоспостереження, GPS-трекерів, сенсорів дорожньої інфраструктури та мобільних застосунків. Аналіз цих даних у реальному часі дозволяє оперативно виявляти закономірності у зміні транспортних потоків, оцінювати рівень завантаженості мережі та здійснювати прогнозування з урахуванням просторових і часових факторів [6].

Поряд із цим значну роль у прогнозуванні транспортних потоків відіграють гібридні моделі.

Схема застосування гібридних моделей у транспорті та логістиці (рис. 4), та схема прогнозування автотранспортних потоків із використанням гібридних моделей (рис. 5) показані далі.

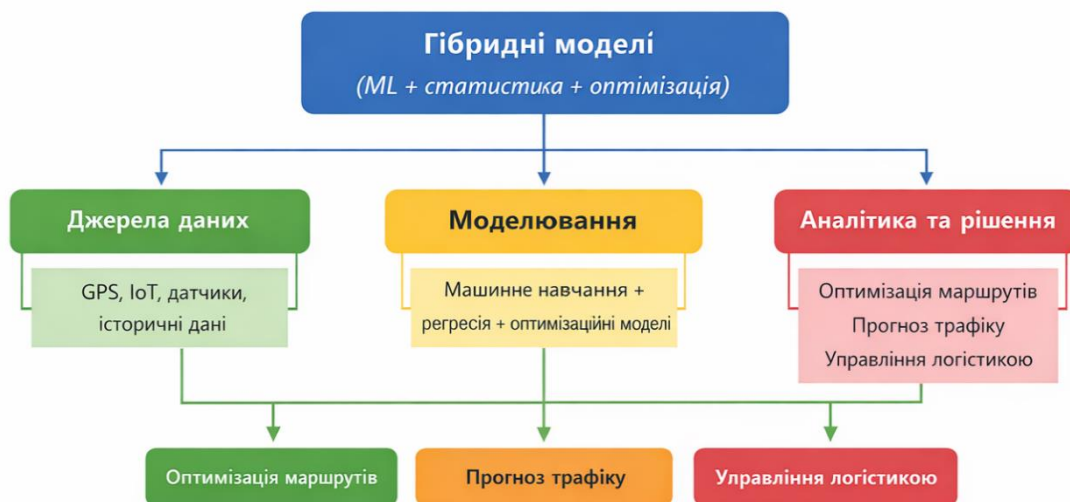


Рисунок 4 – Схема застосування гібридних моделей у транспорті та логістиці



Рисунок 5 – Схема прогнозування автотранспортних потоків із використанням гібридних моделей

Гібридні моделі поєднують можливості класичних статистичних методів із сучасними алгоритмами машинного навчання. Такі моделі ефективно використовуються для короткострокового прогнозування інтенсивності руху на окремих ділянках доріг, де зміни мають стохастичний характер [2, 5].

Іншим перспективним підходом є застосування методів нечіткої логіки (Fuzzy Logic), які дозволяють працювати з неточними, неповними або суперечливими даними. Це особливо актуально для транспортних систем, де умови руху змінюються динамічно, а інформація про параметри потоку може бути частково відсутньою [3].

Важливою складовою сучасних досліджень транспортних процесів є імітаційне моделювання, яке дає змогу аналізувати поведінку транспортних потоків за різних сценаріїв. Імітаційні програмні комплекси, такі як VISSIM, Aimsun або TransModeler, дозволяють оцінити пропускну здатність вулично-дорожньої мережі, визначити потенційні «вузькі місця» та оптимізувати режими регулювання руху. Поєднання таких моделей із алгоритмами штучного інтелекту створює можливість побудови адаптивних систем управління дорожнім рухом, здатних у реальному часі змінювати параметри світлофорного регулювання або маршрути транспортних засобів залежно від поточної ситуації [4, 6].

Використання передових методів прогнозування забезпечує низку стратегічних переваг для транспортної галузі. Зокрема, воно сприяє зниженню рівня заторів, скороченню часу пересування, зменшенню витрат на перевезення та підвищенню безпеки дорожнього руху. Крім того, оптимізація

транспортних потоків дозволяє зменшити рівень шкідливих викидів в атмосферу завдяки більш стабільному режиму руху транспортних засобів [2].

Таким чином, упровадження інтелектуальних методів прогнозування транспортних потоків є важливою умовою створення ефективної та екологічно безпечної транспортної системи. Інтеграція математичного моделювання, алгоритмів машинного навчання та цифрових технологій формує основу концепції «розумного транспорту» (Smart Transport), який забезпечує раціональне використання дорожньої інфраструктури, підвищення комфорту пересування та стає функціонування транспортного комплексу в цілому [1, 4, 6].

ВИСНОВКИ

Ефективне управління автотранспортними потоками є ключовою умовою стабільного функціонування міської транспортної системи. Найбільший ефект досягається за рахунок використання інтелектуальних систем управління, оптимізації маршрутної мережі та впровадження пріоритетів для громадського транспорту.

Комплексний підхід до організації руху дозволяє досягти економії часу, зниження екологічних навантажень та підвищення якості перевезень.

Застосування передових методів прогнозування при управлінні автотранспортними потоками дозволяє істотно підвищити точність оцінки стану транспортної мережі, знизити ризики перевантаження доріг і забезпечити стабільну роботу системи перевезень. Використання нейронних мереж, технологій Big Data, гібридних моделей та імітаційного моделювання створює передумови для розвитку адаптивних систем управління рухом, що є складовою концепції «розумного міста».

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на моделювання транспортних процесів і створення інтегрованих систем управління рухом у містах, на інтеграцію інтелектуальних технологій у практику транспортного планування та управління рухом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.Barbakaru, D., & Chebanova, T. (2022). Методи прогнозування вантажних перевезень транспортних компаній. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті, 3(80), 78-86. <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2022-3-78-86>.

2.Humeniuk O. Traffic flow forecasting when developing an integrated transport scheme for Kyiv / Oleksandra Humeniuk, Serhii Yanishevskiy, Karyna Yushko // Problemy z transportnymy potokamy i napriamy yikh rozv'iazannia : tezy dopovidei III Vseukrainskoi naukovo-teoretychnoi konferentsii, 28 – 30 bereznia 2019 roku, Lviv. — Posvit, 2019. — P. 59–60. — (UPravlinnia rozvytkom transpornykh system, bezpekoiu ta orhanizatsiiei rukhu).

3.Озерова, О. О. Прогнозування пасажирських потоків у великих транспортних вузлах / О. О. Озерова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – № 6 (48). – С. 72–80. – doi: 10.15802/stp2013/19676.

4.. Queen, C. M. Intervention and Causality: Forecasting Traffic Flows Using a Dynamic Bayesian Network [Text] / C. M. Queen, C. J. Albers // Journal of the American Statistical Association. — 2009. — Vol. 104, № 486. — P. 669–681. doi:10.1198/jasa.2009.0042.

5.Планування діяльності автотранспортного підприємства. Методичні аспекти / О. Л. Ляшук, У. М. Плекан, О. П. Цюнь, Т. Б. Пиндус // Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(36), ч.І. — С. 256-262 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).I.256-262](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).I.256-262).

6.Кулявець А., Буров Є. Метод прогнозування затримок доставок та оптимізації маршрутів у логістичних системах // Наукові записки Львівської політехніки. – 2025. – Вип. 18. С. 58-66 <https://doi.org/10.23939/sisn2025.18.1.058>.

7.Голяк А. Ю. Прогнозування ресурсних потоків підприємств мережевої торгівлі методом машинного навчання [Електронний ресурс] / А. Ю. Голяк // Слобожанські наукові читання: соціально-економічні та гуманітарно-правові виміри : [матеріали] Всеукр. наук.-практ. конф. [студентів та аспірантів], 24-25 жовтня 2024 р. / ред. кол.: Н. С. Краснокутська [та ін.] ; відп. за вип. Н. М. Волоснікова ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2024. – С. 87-90..

8.Graph2Route: A Dynamic Spatial-Temporal Graph Neural Network for Pick-up and Delivery Route Prediction. Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. <https://doi.org/10.1145/3534678.3539084>.

9.Duan, Yanjie & Yisheng, Lv. (2016). Travel time prediction with LSTM neural network. 1053-1058. 10.1109/ITSC.2016.7795686..

10.Zhang, J., Zheng, Y., & Qi, D. (2017). Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 31(1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10735>.

11.Kerner, Boris & Lieu, Henry. (2005). The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications; and Theory. Physics Today - PHYS TODAY. 58. 54-56. 10.1063/1.2155762.

12.Kerner, Boris. (2009). Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory. 10.1007/978-3-642-02605-8.

V. Prydiuk, V. Samostian. Effective management of urban passenger road transport flows using advanced methods of their forecasting.

The paper considers the current issues of increasing the efficiency of urban passenger transport flows management in the context of growing urbanization, intensification of traffic and increasing requirements for the quality of transport services for the population. The need to apply modern approaches to forecasting passenger flows as a key element of management decision-making in urban transport systems is substantiated. Existing forecasting methods are analyzed, in particular statistical, economic-mathematical and intellectual, among which special attention is paid to machine learning methods, neural networks and hybrid models.

The main factors influencing the formation and change of passenger flows are identified, including temporal, spatial, socio-economic and infrastructure parameters. An approach to integrating forecasting results into the urban passenger transport management system is proposed, which allows optimizing routes, traffic intervals, vehicle load and reducing operating costs of carriers. The possibilities of using digital technologies, intelligent transport systems and automated dispatching systems to increase the adaptability and efficiency of management are considered.

The expected results of the implementation of the proposed solutions are to increase the efficiency of the city's transport system, reduce passenger waiting times, reduce route congestion and improve environmental performance. The results obtained can be used by local governments, transport enterprises and scientists to develop strategies for the development of urban transport on the basis of sustainability and innovation.

Keywords: traffic flow, urban passenger transportation, traffic management, intelligent transport systems, route optimization, transportation efficiency, forecasting methods, neural networks, Big Data technologies, hybrid models.

ПРИДЮК Валентин Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: mbf@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-7791-1230>

САМОСТЯН Віктор Русланович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: svrmbf@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-6823-8558>

Valentyn PRYDIUK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: mbf@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-7791-1230>

Viktor SAMOSTIAN, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: svrmbf@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-6823-8558>

Дата надходження статті до видання: 17.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/4dw6p741>

Птиця Н.В.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна***ФОРМУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ
ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

У статті досліджено сучасні особливості функціонування логістичних систем доставки вантажів в умовах зростання складності потокових процесів, розвитку електронної комерції та підвищення вимог до рівня сервісу. Встановлено, що збільшення обсягів партійних поставок зумовлює зростання кількості операцій, ускладнення маршрутних мереж та підвищення навантаження на логістичну інфраструктуру. На основі аналізу сучасних досліджень визначено, що значна частка логістичних витрат формується на етапі останньої милі та в точках взаємодії елементів логістичного ланцюга, де виникають втрати часу та ресурсів. Метою дослідження є визначення впливу параметрів логістичної системи на витрати доставки вантажів та розробка практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності її функціонування. У роботі використано методи математичного моделювання та регресійного аналізу для оцінки впливу ключових факторів, зокрема щільності торговельної мережі, радіусу обслуговування, ринкової частки, обсягів товарообігу та коефіцієнта використання вантажності транспортних засобів.

Отримані значення параметрів показують характер впливу та свідчать про наявність раціональних областей їх значень, у межах яких досягається мінімізація логістичних витрат. Доведено існування оптимальних співвідношень між кількістю пунктів на маршруті та радіусом половинного попиту. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для підвищення ефективності планування логістичних систем, оптимізації маршрутів доставки та зниження витрат на етапі останньої милі. Результати дослідження можуть бути застосовані підприємствами роздрібною торгівлі та логістичними операторами в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

Ключові слова: логістична система, логістичні витрати, остання миля; доставка вантажів, оптимізація, логістична мережа, ефективність, система доставки.

ВСТУП

Сучасні логістичні системи, зокрема у сфері дистрибуції та доставки продукції, перебувають у стані трансформації під постійним впливом зовнішнього середовища та цифровізації. Цьому сприяє зростання електронної комерції та підвищення вимог до швидкості та надійності обслуговування. У цих умовах особливої актуальності набуває проблема підвищення ефективності операційних процесів у логістичних системах, що безпосередньо визначають продуктивність транспортно-складських комплексів.

Зростання обсягів дрібнопартійних відправлень, характерне для B2B та B2C-сегмента, призводить до ускладнення руху потоків, збільшення кількості операцій обробки та підвищення навантаження на інфраструктуру розподілу. Згідно [1–2], глобальні витрати на логістичні операції перевищують 300 млрд євро на рік і мають тенденцію до зростання через підвищення складності логістичних систем. Це свідчить про значний потенціал підвищення ефективності саме на рівні операційної організації процесів.

Водночас, ключовою проблемою залишається наявність так званих «вузьких місць» у точках взаємодії елементів логістичного ланцюга (handover points), де виникають затримки, втрати часу та інформаційні розриви. За сучасними оцінками, до 13–19% логістичних витрат формуються саме через неефективність таких операцій [1–2]. Це підтверджує необхідність системного перегляду підходів до організації процесів у логістичних системах.

Додатковим фактором, що загострює проблему, є функціонування транспортно-логістичних систем в умовах нестабільності, зокрема в Україні, де воєнні дії суттєво впливають на інфраструктуру, маршрути та доступність ресурсів. У таких умовах особливої ваги набувають питання адаптивності, гнучкості та ресурсної ефективності логістичних процесів. Таким чином, виникає необхідність у формуванні ефективних підходів до організації та управління операційними процесами логістичних систем, які забезпечують підвищення продуктивності, зниження витрат і стійкість функціонування в умовах високої невизначеності [2, 3].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Теоретичні та прикладні аспекти організації логістичних процесів широко представлені у працях провідних науковців. Значний внесок у розвиток концепцій управління ланцюгами постачання зробили Martin Christopher, Donald Bowersox та David Closs, які обґрунтували необхідність інтегрованого підходу до управління матеріальними потоками.

Сучасні дослідження фокусуються на підвищенні операційної ефективності логістичних систем через [3–6]:

- оптимізацію складських процесів;
- цифрове моделювання та використання цифрових двійників;
- впровадження аналітичних інструментів управління;
- автоматизацію та роботизацію окремих операцій.

Використання цифрових моделей логістичних систем (digital twin) дозволяє підвищити ефективність складських операцій на 20–25% ще до фактичного впровадження змін [7]. Це свідчить про значний потенціал аналітичних підходів до оптимізації.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із підвищенням продуктивності операцій обробки вантажів. За даними сучасних досліджень, якісне планування та автоматизація окремих процесів може збільшити продуктивність у кілька разів, однак її ефективність залежить від структури вантажопотоків та рівня їх стандартизації [7, 8].

Водночас, аналіз літератури показує, що існуючі дослідження переважно розглядають окремі аспекти оптимізації, тоді як питання комплексного удосконалення операційних процесів у логістичних системах, що враховують розширення масштабів мережі, залишаються недостатньо розкритими. Що є особливо важливим в умовах нестабільності та обмежених ресурсів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є визначення впливу параметрів логістичної системи і розробка практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності її функціонування на логістичні витрати, шляхом удосконалення організації операційних процесів доставки вантажів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Функціонування логістичних систем у сучасних умовах характеризується зростанням складності, що обумовлено підвищенням варіативності попиту, скороченням життєвих циклів продукції та необхідністю забезпечення високого рівня сервісу. У таких умовах ефективність систем визначається не лише параметрами транспортних чи складських операцій окремо, а рівнем їх інтеграції та узгодженості.

Ключовою характеристикою сучасних логістичних систем є наявність значної кількості точок взаємодії між елементами (логістичних вузлів), де відбувається передача матеріальних потоків. Саме ці точки часто є джерелом неефективності через затримки, асиметрію інформації та неузгодженість дій учасників процесу. Встановлено, що значна частка втрат у логістичних системах виникає саме на цих етапах, що потребує їх системного аналізу та оптимізації. Важливим напрямом підвищення ефективності є застосування процесного підходу, який передбачає розгляд логістичної системи як сукупності взаємопов'язаних процесів. Це дозволяє виявити вузькі місця, визначити критичні операції та оптимізувати потоки ресурсів. Одним із ефективних інструментів є використання цифрового моделювання, що дозволяє створювати віртуальні копії логістичних систем і тестувати різні сценарії їх функціонування. Це забезпечує можливість оцінки впливу змін без ризику для реальної системи та дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Окрему увагу слід приділити питанням управління ресурсами. Сучасні логістичні системи функціонують в умовах дефіциту трудових ресурсів та високої вартості їх залучення. Це обумовлює необхідність підвищення продуктивності праці шляхом оптимізації операцій та впровадження гнучких форм організації роботи. Важливим аспектом є також забезпечення адаптивності логістичних систем. Умови невизначеності вимагають здатності систем швидко реагувати на зміни зовнішнього середовища, що досягається шляхом гнучкого планування, диверсифікації ресурсів та використання сценарного підходу до управління. Підвищення ефективності логістичних систем потребує комплексного підходу, що поєднує організаційні, технологічні та аналітичні інструменти.

Суттєвим резервом підвищення ефективності є також оптимізація просторової організації логістичних об'єктів. Рациональне розміщення ресурсів і потоків дозволяє скоротити непродуктивні переміщення, що безпосередньо впливає на продуктивність системи. Як показують дослідження [9], неефективне планування логістичної мережі призводить до зростання операційних витрат і зниження швидкості обробки вантажів. Збільшення кількості логістичних об'єктів, швидкості руху товарів через увесь ланцюг постачань та зміна торгівельних форматів, призводить до необхідності застосування системного підходу до організації процесу доставки вантажів на етапі останньої милі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зростання частоти постачань та зменшення розмірів партій вантажів, особливого значення набуває ефективність організації доставки продуктових вантажів на етапі останньої милі. Вказаний

етап є найбільш витратним елементом логістичного ланцюга, частка якого, за сучасними оцінками, може досягати 40–60 % загальних логістичних витрат.

Результати проведених експериментальних досліджень в [10] підтверджують існування екстремуму функції частки логістичних витрат на доставку партійних вантажів залежно від параметрів системи доставки. Отримані регресійні моделі характеризуються достатнім рівнем адекватності та статистичної значущості, що дозволяє використовувати їх як інструмент для оптимізації.

Встановлено, що ключовими факторами, які визначають ефективність функціонування системи доставки продуктових вантажів, є:

- щільність дислокації торгових об'єктів;
- середній радіус обслуговування;
- ринкова доля мережі;
- вартість товарообігу у регіоні;
- коефіцієнт статичного використання вантажності транспортних засобів.

Прийнявши діапазони варіювання аналізованих факторів на трьох рівнях мінімальному, середньому і максимальному (табл. 1), з використанням математичної моделі [9, 10], проведені розрахунки частки логістичних витрат на доставку вантажів для трьох найпоширеніших форматів торгових об'єктів.

Таблиця 1 – Вихідні значення параметрів логістичної системи доставки вантажів

Фактори	Рівні варіювання		
	Мінімальний	Середній	Максимальний
Щільність дислокації торгових об'єктів, од/км ²	0,01	11,735	25,398
Ринкова доля мережі, %	1	25	50
Вартість товарообігу у регіоні, тис. грн.	10382,7	12854,4	15326,2
Середній радіус обслуговування, км	3,569	10,01	16,434
Коефіцієнт статичного використання вантажності	0,4	0,7	1

Аналіз отриманих залежностей [10] показав, що вплив більшості факторів має монотонний, але нелінійний характер. Зокрема, зі збільшенням щільності торгових об'єктів, у які необхідно робити доставку товарів, спостерігається зростання частки логістичних витрат. Це пояснюється ускладненням маршрутної мережі, збільшенням кількості зупинок та зростанням операційних витрат. Подібні висновки узгоджуються з результатами досліджень у сфері логістики останньої милі (last-mile logistics), де підкреслюється, що фрагментація попиту є ключовим драйвером зростання витрат.

Збільшення середнього радіусу обслуговування призводить до зростання транспортної складової витрат через збільшення довжини маршрутів та часу доставки. При цьому виявлено наявність порогових значень, після перевищення яких витрати зростають прискореними темпами, що свідчить про нелінійний характер залежності.

Водночас зростання ринкової долі мережі сприяє зниженню логістичних витрат за рахунок ефекту масштабу, що проявляється у більш ефективному використанні транспортних засобів, консолідації вантажопотоків та оптимізації маршрутів доставки. Це відповідає сучасним концепціям економії на масштабі в логістиці.

З позиції підвищення ефективності операційних процесів доставки вантажів, особливу увагу слід приділити коефіцієнту статичного використання вантажності, який виступає одним із найбільш керованих параметрів системи. Результати дослідження показують, що підвищення рівня завантаження транспортних засобів у діапазоні 0,7–0,85 дозволяє суттєво знизити логістичні витрати на доставку. Таким чином, оптимізація процесів комплектування та консолідації вантажів є важливим напрямом підвищення ефективності.

Встановлено залежність зміни логістичних витрат на доставку вантажів від кількості пунктів на маршруті та радіусу половинного попиту для основних торгових форматів «Гіпермаркет», «Супермаркет» та «Магазин біля дому» (рис. 1). Аналіз закономірностей свідчить про наявні співвідношення кількості пунктів на маршруті розвезення та радіусу половинного попиту, при котрих частка логістичних витрат на доставку є мінімальною.

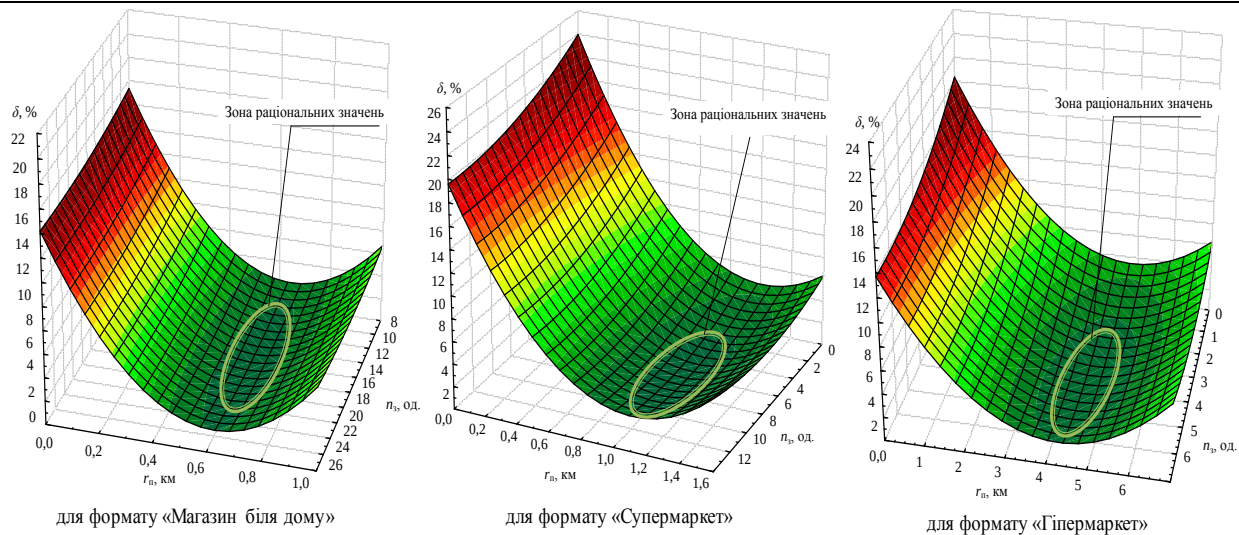


Рисунок 1 – Залежність зміни логістичних витрат на доставку вантажів (δ , %) від кількості пунктів на маршруті (n , од.) та радіусу половинного попиту (r_n)

Отримані області раціональних значень для торгових об'єктів різних форматів свідчать про наявний вплив форматів на логістичні витрати по доставці вантажів на етапі останньої милі, пояснюється різницею у об'ємах реалізації. Тому це варто враховувати при плануванні процесу доставки.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що ефективність функціонування логістичних систем у сучасних умовах визначається рівнем організації операційних процесів та ступенем їх інтеграції. Сформульовано, що найбільший ефект досягається при комплексному застосуванні зазначених підходів, що дозволяє не лише знизити витрати, але й підвищити стійкість логістичних систем в умовах невизначеності. Встановлено, що існує область раціональних значень логістичних параметрів для торгової мережі, що впливають на логістичні витрати доставки вантажів на етапі останньої милі. Отримані результати мають практичне значення та можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування логістичних систем у сучасних умовах, зокрема в контексті планування та забезпечення ефективного процесу доставки вантажів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сумець О. М. Транспорт - найбільш витратна складова логістичної діяльності [Електронний ресурс] / О. М. Сумець. Вісник економіки транспорту і промисловості. 2013. Вип. 43. С. 94–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2013_43_19.
2. Three tech-based innovations have the potential to reduce waste at handover points along the logistics chain. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/digitizing-mid-and-last-mile-logistics-handovers-to-reduce-waste>?
3. Германюк Ю.М., Паленик І. О. (2024). Дослідження логістичних витрат при перевезенні вантажів аграрної групи автомобільним і залізничним видами транспорту. Транспортні системи та технології перевезень, (27), 71–82. <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307370>.
4. Самодай В., Донський М., Гладун М. (2023). Оптимізація управління логістичними витратами в діяльності підприємств. Економіка та суспільство, (55). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-34>.
5. Птиця Н.В., Мельник О.С., Мельник О.С. Застосування принципів логістичного управління при організації діяльності транспортного підприємства. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ. 2023. №1 (20) С. 198-205. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20>.
6. Птиця Н.В., Макарічев О.В., Ковцур К.Г. Ефективна організація розподілу вантажопотоків у межах міста та фактори, що на неї впливають. Вісник Вінницького політехнічного інституту. Науковий журнал. – Вінниця: ВНТУ. 2024. №2 (173) С. 94-100. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-94-100>.

7. «Цифрові двійники» – новий рівень розвитку ланцюгів постачання. URL: <https://logist.fm/news/cifrovi-dviyniki-noviy-riven-rozvitku-lancyugiv-postachannya>.
8. K. Kovtsur, N. Ptytsia, Ye. Liubiy, V. Fedorov An approach to determine vehicle idle time at unloading points. AIP Conference Proceedings 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.
9. Natalia Ptytsia. City Retail Network Influence on Transportation Expenses. SHS Web of Conferences 67, 03011 (2019). NTI-UkrSURT 2019: Published online: 15 October 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196703011>.
10. Птиця Н.В. Формування процесу доставки дрібнопартійних вантажів у логістичній системі роздрібно торгівельної мережі: Дис ... канд. техн. наук: 05.22.01. / ХНАДУ: Харків, 2020. 185 с.

PREFERENCES

1. Sumets O. M. Transport - naibilsh vytratna skladova lohistychnoi diialnosti [Elektronnyi resurs] / O. M. Sumets. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti. 2013. Vyp. 43. S. 94–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2013_43_19.
2. Three tech-based innovations have the potential to reduce waste at handover points along the logistics chain. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/digitizing-mid-and-last-mile-logistics-handovers-to-reduce-waste?>
3. Hermaniuk Yu.M., Palenyk I. O. (2024). Doslidzhennia lohistychnykh vytrat pry perevezenni vantazhiv ahrarnoi hrupy avtomobilnym i zaliznychnym vydamy transportu. Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen, (27), 71–82. <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307370>.
4. Samodai V., Donskyi M., Hladun M. (2023). Optymizatsiia upravlinnia lohistychnymy vytratamy v diialnosti pidpriemstv. Ekonomika ta suspilstvo, (55). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-34>.
5. Ptytsia N.V., Melnyk O.S., Melnyk O.S. Zastosuvannia pryntsyviv lohistychnoho upravlinnia pry orhanizatsii diialnosti transportnoho pidpriemstva. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal. – Lutsk: LNTU. 2023. №1 (20) S. 198-205. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20>.
6. Ptytsia N.V., Makarichev O.V., Kovtsur K.H. Efektyvna orhanizatsiia rozpodilu vantazhopotokiv u mezhakh mista ta factory, shcho na nei vplyvaiut. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. Naukovyi zhurnal. – Vinnytsia: VNTU. 2024. №2 (173) S. 94-100. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-94-100>.
7. «Tsyfrovi dviinyky» – novyi riven rozvytku lantsiuhiv postachannia. URL: <https://logist.fm/news/cifrovi-dviyniki-noviy-riven-rozvitku-lancyugiv-postachannya>.
8. K. Kovtsur, N. Ptytsia, Ye. Liubiy, V. Fedorov An approach to determine vehicle idle time at unloading points. AIP Conference Proceedings 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.
9. Natalia Ptytsia. City Retail Network Influence on Transportation Expenses. SHS Web of Conferences 67, 03011 (2019). NTI-UkrSURT 2019: Published online: 15 October 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196703011>.
10. Ptytsia N.V. Formuvannia protsesu dostavky dribnopartinykh vantazhiv u lohistychnii systemi rozdrubnoi torhivelnoi merezhi: Dys ... kand. tekhn. nauk: 05.22.01. / KhNADU: Kharkiv, 2020. 185 s.

Ptytsia N.V. Formation of an effective cargo delivery system based on optimization of logistics processes

The article examines the modern features of the functioning of logistics systems for cargo delivery in the context of increasing complexity of flow processes, the development of e-commerce and increased requirements for the level of service. It is established that the increase in the volume of batch deliveries leads to an increase in the number of operations, the complication of route networks and an increase in the load on the logistics infrastructure. Based on the analysis of modern research, it is determined that a significant share of logistics costs is formed at the last mile stage and at the points of interaction of elements of the logistics chain, where losses of time and resources occur. The aim of the study is to determine the impact of logistics system parameters on cargo delivery costs and develop practical recommendations for improving the efficiency of its operation. The work uses mathematical modeling and regression analysis methods to assess the impact of key factors, including the density of the retail network, service radius, market share, turnover volumes, and vehicle load factor.

The obtained parameter values show the nature of the influence and indicate the presence of rational areas of their values, within which the minimization of logistics costs is achieved. The existence of optimal relationships between the number of points on the route and the radius of half demand is proven. The practical significance of the results is that they can be used to improve the efficiency of logistics planning, optimize delivery routes, and reduce last-mile costs. The results of the study can be applied by retailers and logistics operators in conditions of uncertainty and limited resources.

Key words: logistics system, logistics costs, last mile; cargo delivery, optimization, logistics network, efficiency, delivery system.

ПТИЦЯ Наталія Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, e-mail: nataliya.ptitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4559-7651>

PTYTSIA Natalia, Ph. D. of Engineering, Associate Professor at the Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: nataliya.ptitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4559-7651>

Дата надходження статті до видання: 11.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

<https://doi.org/10.36910/he175s59>

Рижий О.П., Ігнатюк Р.М., Стадник О.С., Морозюк С.В., Серілко Д.Л.
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПОРШНЕВОГО ДВЗ З КОРОМИСЛОВО-ПОВЗУННИМ МЕХАНІЗМОМ

Сучасний стан розвитку автомобілебудування характеризується високими вимогами до паливної економічності, екологічності та надійності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Попри активне використання електромобілів, поршневі ДВЗ залишаються основним джерелом механічної енергії у більшості транспортних засобів. Одним із ключових напрямів підвищення їх ефективності є зниження механічних втрат, мінімізація інерційних навантажень та покращення кінематичних характеристик кривошипно-шатунного механізму (КШМ), який забезпечує відповідні техніко-експлуатаційні характеристики даних двигунів.

Проаналізовано сучасні тенденції вдосконалення кривошипно-шатунних механізмів та встановлено, що для кожного конкретного випадку необхідна відповідна методика інженерного розрахунку, яка враховує всі особливості модернізованої конструкції кривошипного вузла.

Наведено методику розрахунку кінематики коромислово-повзунного механізму поршневого ДВЗ, який розроблений колективом науковців Національного університету водного господарства та природокористування. Отримано вирази для визначення переміщення поршня, його швидкості та прискорення в залежності від кута повороту шатуна (кривошипа). Представлено результати аналітичних досліджень даного двигуна та отримані графічні залежності переміщення, швидкості та прискорення поршня від конструктивних параметрів коромислово-повзунного механізму.

Отримані результати підтверджують перспективність використання коромислово-повзунного механізму як альтернативи для ДВЗ з традиційною конструкцією КШМ. Запропонована методика може бути використана для подальших досліджень динаміки, оптимізації конструктивних параметрів і проектування поршневих ДВЗ нового зразка з покращеними характеристиками та більшою ефективністю.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, кривошипно-шатунний механізм, коромислово-повзунний механізм, переміщення, швидкість та прискорення поршня.

ВСТУП

Дослідження та розробка нових конструкцій ДВЗ є досить актуальним завданням на даний час, що дозволяє створити високоефективні силові агрегати з високим ресурсом роботи без зниження споживчих якостей автомобілів. Одним із напрямів цих робіт є збільшення літрової потужності сучасних двигунів, підвищення їх паливної економічності та зменшення величини інерційних сил, які виникають під час здійснення зворотно-поступальних та обертових рухів деталей.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кривошипно-шатунний механізм, який забезпечує перетворення зворотно-поступального руху поршня на обертальний рух колінчастого валу має ряд недоліків, серед яких — значні інерційні навантаження та нерівномірність крутного моменту за робочий цикл. Ці фактори обмежують подальше підвищення ефективності, надійності й довговічності ДВЗ. Практичне впровадження нових конструкцій силових установок обмежується відсутністю методики розрахунку, складністю конструкції кривошипного вузла та визначенням ресурсу працездатності шарнірних з'єднань.

Аналіз літературних джерел [1-10, 12] свідчить про те, що питання вдосконалення конструкцій ДВЗ тісно пов'язане з розробкою аналітичних моделей кінематики та динаміки силових механізмів, що дозволить встановити вплив основних геометричних параметрів на характер руху елементів конструкції, їх інерційне навантаження та нерівномірність крутного моменту. Тому перспективним є проектування, моделювання та експериментальна перевірка нових конструкцій КШМ, які забезпечать покращення експлуатаційних характеристик двигунів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В руслі даних досліджень колективом авторів запропонована нова конструкція силового механізму поршневого ДВЗ принцип дії якого докладно описано в літературі [11]. В даному двигуні перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух привідного валу реалізовано за допомогою впровадження коромислово-повзунного механізму (КПМ).

Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції поршневого двигуна потрібно проаналізувати велику кількість параметрів його роботи. Першочерговим завданням є розробка методики розрахунку кінематики КПМ, на основі якої можна змодельовати робочий цикл двигуна, визначити вихідні параметри для подальших досліджень, а також провести аналіз динаміки КПМ та робочого процесу двигуна.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення подальшого аналізу введемо відповідні позначення згідно рис. 1:
 φ – кут обертання шатуна (кривошипа) АС відносно осі поршневого пальця (точка А);
 β – кут відхилення коромисла при поточному куті повороту кривошипа φ ;
 L – довжина коромисла ОС;
 R – радіус обертання або довжина шатуна АС;
 A_0 – положення поршня у ВМТ;
 S_x – проміжне значення ходу поршня;

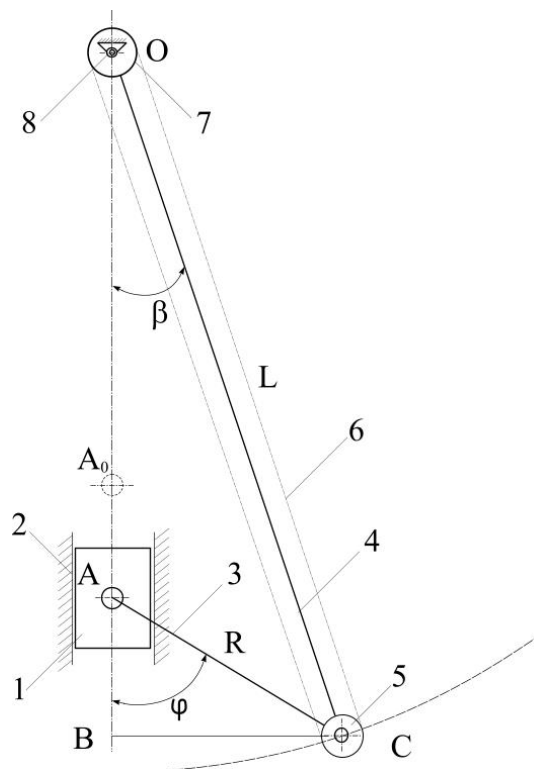


Рисунок 1 – Схема до розрахунку кінематики КПМ:

1 – поршень; 2 – циліндр; 3 – шатун; 4 – коромисло; 5 – ведуча зірочка; 6 – ланцюгова передача;
 7 – ведена зірочка; 8 – привідний вал

Початкове положення наведеного КПМ, коли поршень знаходиться у ВМТ, приймаємо таке, при якому $\varphi = 0$ (шатун і коромисло суміщені та лежать у вертикальній площині). Беручи до уваги розрахункову схему (рис.2) для даного положення справедлива рівність

$$OA_0 = L - R.$$

Врахувавши безрозмірний параметр

$$\lambda = \frac{R}{L},$$

Отримаємо

$$OA_0 = L - \lambda L = L(1 - \lambda).$$

Переміщення поршня (положення точки А) в будь-який момент часу можна визначити як

$$S_x = OB - AB - OA_0,$$

або через значення поточних кутів обертання шатуна (φ) та коромисла (β)

$$S_x = L \cos \beta - R \cos \varphi - L(1 - \lambda). (1)$$

Із трикутника OCB маємо

$$\sin \beta = \frac{R \sin \varphi}{L} = \lambda \sin \varphi.$$

Звідки

$$\beta = \arcsin(\lambda \sin \varphi).$$

Враховуючи, що

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi},$$

Отримаємо рівняння (1) у вигляді

$$S_x = L \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} - R \cos \varphi - L(1 - \lambda). (2)$$

Або

$$\begin{aligned} S_x &= L \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} - \lambda L \cos \varphi - L(1 - \lambda) = \\ &= L \left(\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} - \lambda \cos \varphi - 1 + \lambda \right). (3) \end{aligned}$$

На рис. 2 наведені графіки переміщення поршня $S_x = f(\varphi)$ при різних значеннях безрозмірного параметра λ .

Величину швидкості поршня знайдемо диференціюванням рівняння (2) або (3)

$$V = \frac{dS_x}{dt} = \frac{dS_x}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt},$$

де $\frac{d\varphi}{dt} = \omega$ - кутова швидкість шатуна.

Приймаємо, що для даного силового механізму $\omega = \text{const}$, тоді

$$V = \omega \frac{dS_x}{d\varphi},$$

або

$$V = R\omega \sin \varphi - \frac{L\lambda^2 \omega \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} = R\omega \left(\sin \varphi - \frac{\lambda \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right). (4)$$

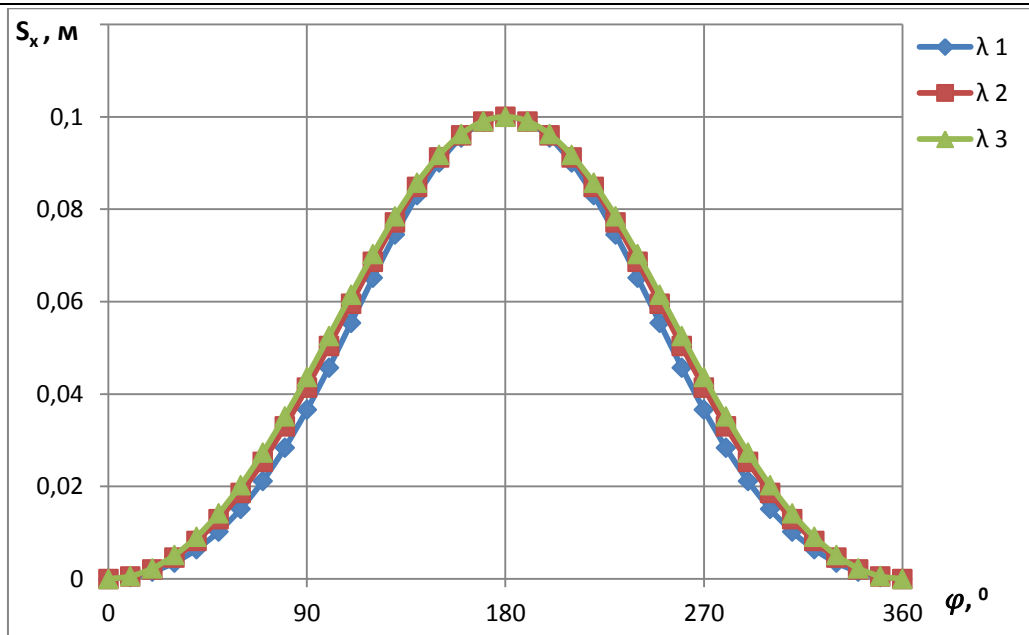


Рисунок 2 – Залежності переміщення поршня S_x від кута повороту шатуна для різних значень безрозмірного параметра λ :
1 - $\lambda_1 = 0,5$; 2 - $\lambda_2 = 1,0$; 3 - $\lambda_3 = 1,5$.

Графічні залежності зміни швидкості поршня показані на рис.3.

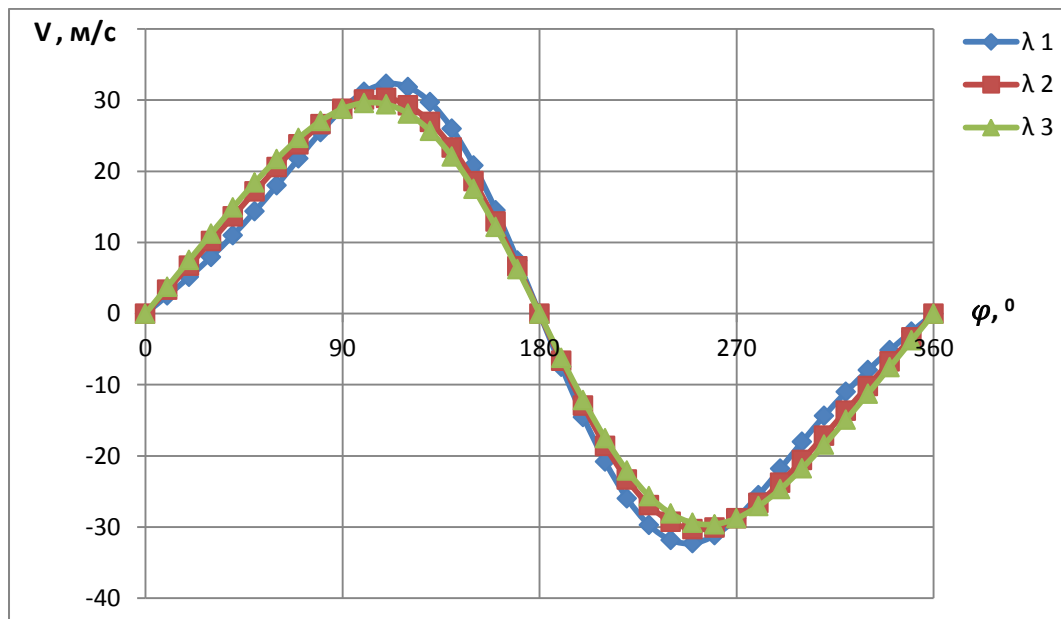


Рисунок 3 – Залежності швидкості поршня V від кута повороту шатуна для різних значень безрозмірного параметра λ :
1 - $\lambda_1 = 0,5$; 2 - $\lambda_2 = 1,0$; 3 - $\lambda_3 = 1,5$.

Залежність для визначення прискорення поршня отримаємо шляхом диференціювання виразу (4), а саме

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt},$$

$$\text{при } \omega = \text{const} \quad a = \omega \frac{dV}{d\varphi},$$

або

$$a = R\omega^2 \left[\cos \varphi - \frac{\lambda \cos 2\varphi}{\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \varphi}} - \frac{\lambda^3 \sin^2 2\varphi}{(4-4\lambda^2 \sin^2 \varphi)\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right] =$$

$$= R\omega^2 \left[\cos \varphi - \frac{\lambda \cos 2\varphi}{\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \varphi}} - \frac{\lambda^3 \sin^2 2\varphi}{4(1-\lambda^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \right]. \quad (5)$$

Графічні залежності прискорення поршня показані на рис.4.

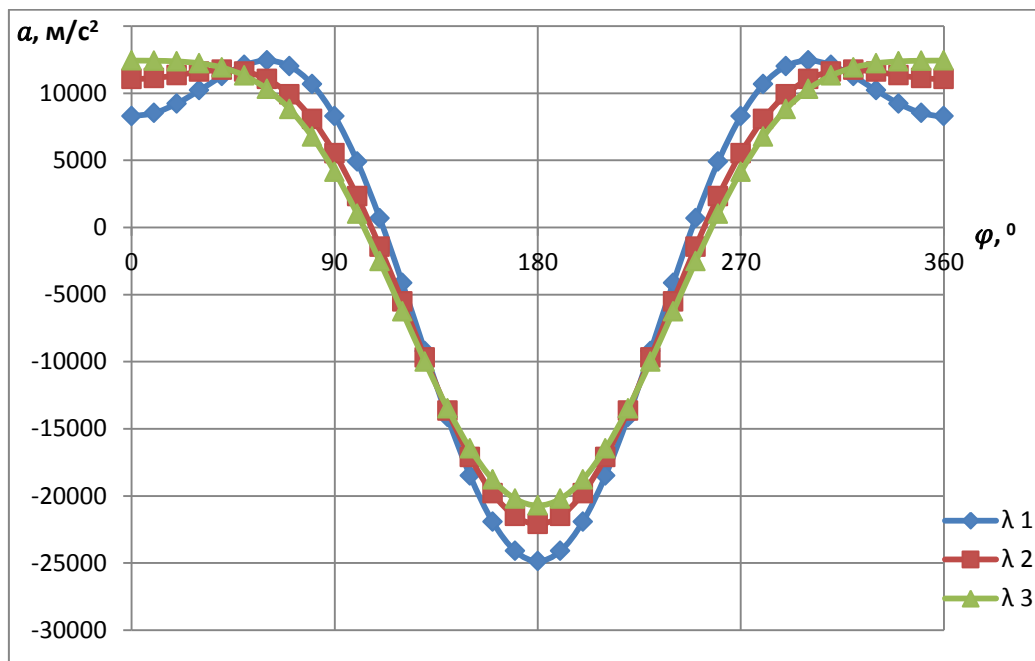


Рисунок 4 – Залежності прискорення поршня a від кута повороту шатуна для різних значень безрозмірного параметра λ :

1 - $\lambda_1 = 0,5$; 2 - $\lambda_2 = 1,0$; 3 - $\lambda_3 = 1,5$.

Графічні залежності (рис.3, рис.4, рис.5), були побудовані на основі проведених аналітичних досліджень для трьох окремих довжин коромисел ($L_1=2R$; $L_2=3R$; $L_3=4R$), довжини шатуна $R=S/2$ та ходу поршня $S=100$ мм.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

З аналізу отриманих результатів видно, що форма кривої переміщення поршня S_x (рис.2) зберігає симетричність відносно положень верхньої та нижньої мертвих точок. При цьому зі збільшенням величини λ відбуваються незначні зміни амплітуди та підвищується плавність ходу поршня. Також зі збільшенням довжини коромисла зменшується вплив кута повороту шатуна φ на переміщення поршня S_x . Це пояснюється тим, що довші коромисла даних коромислово-повзунних механізмів мають менший кут відхилення від вертикального положення, зменшуючи «бічний» рух поршня та підвищуючи загальну ефективність механізму.

Також спостерігається вплив співвідношення λ на характер кривих швидкості V та прискорення a поршня (Рис.3, Рис.4). Так, коротші за довжиною коромисла призводять до вищих швидкостей руху поршня та більш різких прискорень, тоді як довші - забезпечують кращу плавність руху поршня. Це відбувається тому, що коротші коромисла призводять до більшого кутового зміщення поршня на кожному одиницю оберту шатуна.

Аналіз показує, що більшою мірою на величину прискорення поршня a впливає довжина коромисла. Довше коромисло L забезпечує більш плавне зростання значення прискорення поршня a протягом усього його ходу. Зменшення довжини коромисла ($\lambda_1 = 0,5$) сприяє зростанню максимальних значень прискорення поршня a в межах 20...25% в порівнянні з механізмами, що мають довші коромисла.

Наведені вище результати свідчать про те, що зміна співвідношення геометричних параметрів КПМ дозволяє впливати на кінематичні характеристики двигуна. Таким чином, шляхом вибору раціонального значення параметра λ можна забезпечити оптимальний характер переміщення поршня, що дозволить знизити пікові навантаження на деталі КПМ та підвищити зрівноваженість роботи двигуна в цілому.

ВИСНОВКИ

Отримані аналітичні залежності кінематики КПМ дозволяють виявити характерні особливості пов'язані з переміщенням, швидкістю та прискоренням поршня під час здійснення робочого циклу ДВЗ. Даний розрахунок дає можливість здійснити раціональний підбір конструктивних параметрів двигуна (довжина коромисла, радіус обертання шатуна та ін.). Наведена методика розрахунку кінематики силового механізму може застосовуватися для подальших досліджень динамічних характеристик поршневого двигуна з коромислово-повзунним механізмом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Arabacı, E. (2020). Analysis of design parameters of a novel modified reciprocating mechanism. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 4(3), 116-124.
2. Beckers, J., Verrelst, B., Contino, F., & Van Mierlo, J. (2022). Experimental investigation of the dynamics of a slider-crank mechanism with local linear force input. *Journal of Applied Mechanics*, 89(4), Article 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4053146>
3. Georgitzikis, V., Pettas, D., Loukas, K., & Mavropoulos, G. (2023). LESS Spark Ignition Engine: An Innovative Alternative to the Crankshaft Mechanism. *Energies*, 16(18), 6655. <https://doi.org/10.3390/en16186655>
4. Gultekin, E., & Cinar, C. (2019). A thermodynamic comparison of rhombic-drive and slider-crank mechanisms for a twostroke SI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.
5. Kukuča, Pavol & Barta, Dalibor & Dižo, J. & Caban, Jacek. (2018). Piston kinematics of a combustion engine with unconventional crank mechanism. *MATEC Web of Conferences*. 244. 03006. 10.1051/mateconf/201824403006.
6. Sahin, D.E. Dynamic Design of Crank-Rocker SI Engine Mechanism. *J. Vib. Eng. Technol.* 10, 2853–2875 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00629-2>
7. Sakhraoui, A., Saggar, M., Ayari, F. et al. Kinematics modeling of the gear-based crank mechanism engine regardless of the compressions ratio variations. *Sci Rep* 14, 2807 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53085-1>.
8. Stojanovic, Nadica & Grujic, Ivan & Nk, Nair. (2022). The analysis of the unconventional piston mechanism conception and comparison with the conventional piston mechanism. *Mobility and Vehicle Mechanics*. 10.24874/mvm.2022.48.03.02.
9. Грабар І.Г. Вплив масово геометричних параметрів кривошипно-шатунного механізму на крутний момент двигуна внутрішнього згоряння / І.Г. Грабар, А.В. Ільченко, В.О. Ломакін // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. – 2007. – №6(112). – С. 52-56.
10. Грабар І.Г. Моделювання процесу зміни положення центра мас кривошипно-шатунного механізму двигуна внутрішнього згоряння / І.Г. Грабар, А.В. Ільченко, В.О. Ломакін // Вісник ЖДТУ. – 2007 р. – № III (42). – С. 17-23.
11. Коромислово-повзунний механізм поршневої машини: пат. 137743 Україна, МПК F01B 9/00. № u2019 03216; заявл. 01.04. 2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
12. Матейчик В. П., Цюман М. П. Дослідження впливу регулювальних параметрів на паливну економічність і екологічні показники бензинового двигуна з системою нейтралізації відпрацьованих газів». Наукові нотатки: міжвуз. зб. Луцьк, 2010. № 28. С. 331–335.

REFERENCES

1. Arabacı, E. (2020). Analysis of design parameters of a novel modified reciprocating mechanism. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 4(3), 116-124.
2. Beckers, J., Verrelst, B., Contino, F., & Van Mierlo, J. (2022). Experimental investigation of the dynamics of a slider-crank mechanism with local linear force input. *Journal of Applied Mechanics*, 89(4), Article 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4053146>

3. Georgitzikis, V., Pettas, D., Loukas, K., & Mavropoulos, G. (2023). LESS Spark Ignition Engine: An Innovative Alternative to the Crankshaft Mechanism. *Energies*, 16(18), 6655. <https://doi.org/10.3390/en16186655>
4. Gultekin, E., & Cinar, C. (2019). A thermodynamic comparison of rhombic-drive and slider-crank mechanisms for a twostroke SI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.
5. Kukuča, Pavol & Barta, Dalibor & Dižo, J. & Caban, Jacek. (2018). Piston kinematics of a combustion engine with unconventional crank mechanism. *MATEC Web of Conferences*. 244. 03006. 10.1051/mateconf/201824403006.
6. Sahin, D.E. Dynamic Design of Crank-Rocker SI Engine Mechanism. *J. Vib. Eng. Technol.* **10**, 2853–2875 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00629-2>
7. Sakhraoui, A., Saggar, M., Ayari, F. *et al.* Kinematics modeling of the gear-based crank mechanism engine regardless of the compressions ratio variations. *Sci Rep* **14**, 2807 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53085-1>.
8. Stojanovic, Nadica & Grujic, Ivan & Nk, Nair. (2022). The analysis of the unconventional piston mechanism conception and comparison with the conventional piston mechanism. *Mobility and Vehicle Mechanics*. 10.24874/mvm.2022.48.03.02.
9. Hrabar I.H. Vplyv masovo heometrychnykh parametriv kryvoshypno-shatunnoho mekhanizmu na krutnyi moment dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia / I.H. Hrabar, A.V. Ilchenko, V.O. Lomakin // *Visn. Skhidnoukr. derzh. un-tu*. – 2007. – №6(112). – S. 52-56.
10. Hrabar I.H. Modeliuvannia protsesu zminy polozhennia tsentra mas kryvoshypno-shatunnoho mekhanizma dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia / I.H. Hrabar, A.V. Ilchenko, V.O. Lomakin // *Visnyk ZhDTU*. – 2007 r. – № III (42). – S. 17-23.
11. Koromyslovo-povzunnyi mekhanizm porshnevoi mashyny: pat. 137743 Ukraina, MPK F01V 9/00. № u2019 03216; zaiavl. 01.04. 2019; opubl. 11.11.2019, Biul. № 21.
12. Mateichyk V. P., Tsiuman M. P. Doslidzhennia vplyvu rehuliuvalnykh parametriv na palyvnu ekonomichnist i ekolohichni pokaznyky benzynovoho dvyhuna z systemoiu neitralizatsii vidpratsovanykh haziv». *Naukovi notatky: mizhvuz. zb. Luts'k*, 2010. № 28. S. 331–335.

O. Ryzhyi, R. Ihnatiuk, O. Stadnyk, S. Moroziuk, D. Serilko, Kinematic analysis of a piston internal combustion engine with a rocker-slider mechanism.

The current state of development of the automotive industry is characterized by high requirements for fuel efficiency, environmental friendliness and reliability of internal combustion engines (ICE). Despite the active use of electric vehicles, piston ICEs remain the main source of mechanical energy in most vehicles. One of the key areas for increasing their efficiency is to reduce mechanical losses, minimize inertial loads and improve the kinematic characteristics of the crank mechanism (CKM), which provides the appropriate technical and operational characteristics of these engines.

The current trends in the improvement of crank mechanisms are analyzed and it is established that for each specific case, an appropriate engineering calculation method is required, which takes into account all the features of the modernized design of the crank assembly.

The method for calculating the kinematics of the rocker-slider mechanism of a piston ICE, which was developed by a team of scientists from the National University of Water Management and Environmental Management, is presented. Expressions for determining the piston displacement, its speed and acceleration depending on the angle of rotation of the connecting rod (crank) are obtained. The results of analytical studies of this engine are presented and graphical dependences of the piston displacement, speed and acceleration on the design parameters of the rocker-slider mechanism are obtained.

The results obtained confirm the prospects of using the rocker-slider mechanism as an alternative for internal combustion engines with a traditional rocker-slider design. The proposed methodology can be used for further research into dynamics, optimization of design parameters, and design of new piston internal combustion engines with improved characteristics and greater efficiency.

Key words: internal combustion engine, crank mechanism, rocker-slider mechanism, piston displacement, speed and acceleration.

РИЖИЙ Олександр Петрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: o.p.ryzhyi@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8592-1217>.

ІГНАТЮК Роман Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: r.m.ihnatiuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1004-1469>.

СТАДНИК Олександр Святославович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: o.s.stadnyk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9066-3806>.

МОРОЗІУК Сергій Володимирович, старший викладач кафедри автомобілів та автомобільного господарства, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: s.v.moroziuk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8904-9614>.

СЕРІЛКО Дмитро Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: d.l.serilko@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5881-2413>.

Oleksandr RYZHYI, PhD, Associate Professor of Automobiles and Automotive Industry Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: o.p.ryzhyi@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8592-1217>.

Roman IHNATIUK, PhD, Associate Professor of Automobiles and Automobile Industry Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: r.m.ihnatiuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1004-1469>.

Oleksandr STADNYK, PhD, Associate Professor of Automobiles and Automobile Industry Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: o.s.stadnyk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9066-3806>.

Serhii MOROZIUK, Senior Lecturer of Automobiles and Automobile Industry Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: s.v.moroziuk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8904-9614>.

Dmytro SERILKO, PhD, Associate Professor of the Construction, Road and Reclamation Machinery Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: d.l.serilko@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5881-2413>.

Дата надходження статті до видання: 25.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.02.2026

<https://doi.org/10.36910/4wn7pr53>

Самчук Л.М., Придальний Б.І., Гулієва Н.М., Сичук В.А.
*Луцький національний технічний університет***АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ У ЗВАРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ**

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення точності позиціонування промислових роботів у роботизованому зварюванні. Метою роботи є порівняльний аналіз повторюваності та абсолютної точності маніпуляторів, а також чинників, що визначають відхилення траєкторії інструмента в реальних умовах зварювального процесу. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на системному аналізі наукових публікацій, міжнародних стандартів і відкритої технічної документації провідних виробників промислових роботів. Показано, що паспортна повторюваність не відображає повною мірою фактичну точність зварювання, оскільки реальне зміщення ТСР формується під загальним впливом кінематичних, теплових, динамічних і сенсорних чинників. Систематизовано основні джерела похибки та встановлено доцільність їх поділу на чотири групи: кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. Узагальнення літературних даних показало, що підвищення температури в зоні зварювання на 10-30 °С може спричинити зміщення траєкторії інструмента на 0,1-0,5 мм залежно від довжини робочого плеча маніпулятора. У межах узагальненого розрахункового аналізу показано, що за помірних умов сумарна похибка позиціонування може становити близько 0,24 мм, а при інтенсивному зварюванні зростати до близько 0,50 мм, причому частка теплової складової є однією з домінуючих. Проаналізовано технічні рішення, що застосовуються провідними виробниками, зокрема кінематичне калібрування, алгоритми динамічної компенсації руху, машинний зір, адаптивне відстеження шва та цифрову верифікацію траєкторії. Обґрунтовано, що найбільш доцільним для підвищення точності позиціонування є комплексний підхід, який поєднує калібрування, сенсорну корекцію, температурну компенсацію та цифрові засоби валідації процесу. Отримані узагальнення можуть бути використані для обґрунтованого вибору технічних рішень під час проєктування, налаштування та модернізації роботизованих зварювальних комплексів.

Ключові слова: автоматичне керування; мехатронні приводи роботів; сервіс роботизованого устаткування; вплив теплових ефектів, проєктування обробного обладнання.

ВСТУП

У сучасному зварювальному виробництві точність позиціонування промислового робота безпосередньо визначає якість формування шва, стабільність технологічного процесу та рівень виробничого браку. Особливої ваги ця проблема набуває в умовах застосування офлайн-програмування, складних просторових траєкторій і змінних теплових навантажень, коли паспортної повторюваності маніпулятора недостатньо для забезпечення потрібної реальної точності ведення інструмента. Наявні наукові підходи підтверджують ефективність кінематичного калібрування, удосконалення систем керування, адаптивного відстеження шва та врахування температурних деформацій. Однак у більшості досліджень ці чинники розглядаються окремо, без комплексного аналізу їх загального впливу на точність позиціонування робота саме в умовах зварювального процесу.

У роботизованому зварюванні точність позиціонування визначає геометрію шва, стабільність процесу та рівень дефектності. Особливо це важливо в умовах офлайн-програмування, складних просторових траєкторій і змінних теплових навантажень, коли паспортної повторюваності маніпулятора недостатньо для забезпечення потрібної фактичної точності ведення інструмента.

Невирішена проблема полягає в тому, що недостатньо дослідженим залишається питання комплексного оцінювання точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій з одночасним урахуванням кінематичних, теплових і динамічних чинників, а також із чітким розмежуванням повторюваності та абсолютної точності як різних, але взаємопов'язаних характеристик. Саме ця невирішена проблема зумовлює необхідність порівняльного аналізу сучасних підходів до забезпечення точності позиціонування роботів у роботизованому зварюванні.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження точності позиціонування промислових роботів у зварювальних операціях зосереджені переважно на кількох напрямках: удосконаленні систем керування [1], кінематичному калібруванні та ідентифікації параметрів маніпуляторів [2, 5-9], офлайн-програмуванні траєкторій [3], адаптивному відстеженні шва [4, 10], а також оцінюванні впливу теплових деформацій [10]. Важливу нормативну основу для аналізу характеристик точності

становлять міжнародні стандарти оцінювання промислових роботів [11]. Роботи, присвячені системам керування та калібруванню [1, 2, 5, 9, 12], переконливо доводять, що геометричні та кінематичні похибки можуть бути суттєво зменшені. Проте ці підходи здебільшого орієнтовані на підвищення абсолютної точності в стандартизованих або стендових умовах і не враховують повною мірою специфіку реального зварювального процесу, де на траєкторію інструмента додатково впливають теплові та динамічні збурення. Отже, калібрування є необхідною, але недостатньою умовою забезпечення високої якості роботизованого зварювання. Дослідження офлайн-програмування [3] показують значний потенціал цього підходу для скорочення часу підготовки виробництва та формування траєкторій на основі CAD-моделей. Водночас ефективність OLP безпосередньо залежить від абсолютної точності робота та відповідності віртуальної моделі реальному технологічному комплексу. За відсутності належного калібрування і компенсації процесних похибок офлайн-згенерована траєкторія не забезпечує потрібного положення інструмента в зоні зварювання. Праці, присвячені адаптивному відстеженню шва [4, 13], демонструють ефективність сенсорної корекції траєкторії безпосередньо під час виконання зварювальних операцій. Проте такі системи не замінюють базової точності робототехнічного комплексу, а лише компенсують частину відхилень у реальному часі. Тому сенсорна адаптація повинна розглядатися як доповнення до калібрування, а не як його альтернатива. Окрему групу становлять дослідження теплових деформацій [10], які підтверджують суттєвий вплив температурного чинника на зміщення ТСП у процесі зварювання. Це показує обмеженість підходів, у яких точність позиціонування оцінюється лише через геометричні та керувальні параметри. Разом з тим у більшості робіт теплові, кінематичні та динамічні чинники аналізуються ізольовано, без інтегрованого оцінювання їх сумарного впливу на похибку позиціонування. Праці [13, 14] розкривають конструктивні, кінематичні та силові засади механізмів маніпулювання, але не висвітлюють проблему точності кінцевого положення в реальному циклі. Як показано в [15], навіть за жорсткого упора точність обмежується залишковою динамічною похибкою, тому поряд із конструктивними рішеннями потрібна активна компенсація відхилень.

Таким чином, літературні джерела підтверджують важливість калібрування, удосконалення керування, офлайн-програмування та сенсорної компенсації для підвищення точності промислових роботів. Однак недостатньо опрацьованим залишається питання комплексного порівняльного аналізу точності позиціонування роботів у зварювальних операціях з одночасним урахуванням кінематичних, теплових і динамічних чинників, а також із чітким розмежуванням повторюваності та абсолютної точності. Дана недостатньо висвітлена проблема визначає актуальність даного дослідження.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є порівняльний аналіз сучасних підходів до забезпечення точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій з урахуванням особливостей повторюваності, абсолютної точності та впливу кінематичних, теплових і динамічних чинників на відхилення траєкторії інструмента. Завданнями дослідження є: проаналізувати сучасні наукові підходи до оцінювання точності позиціонування промислових роботів у роботизованому зварюванні; визначити та систематизувати основні чинники, що впливають на відхилення траєкторії інструмента під час виконання зварювальних операцій; порівняти технологічні рішення, що застосовуються для підвищення точності позиціонування промислових роботів у зварювальному виробництві; оцінити доцільність комплексного врахування кінематичних, теплових і динамічних складових при аналізі точності позиціонування роботів у процесах зварювання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження має оглядово-аналітичний характер і спрямоване на порівняльне оцінювання підходів до забезпечення точності позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій. Результати дослідження ґрунтуються на системному аналізі наукових публікацій, міжнародних стандартів та відкритої технічної документації провідних виробників промислових роботів.

Порівняльний аналіз виконували за такими критеріями: повторюваність позиціонування; абсолютна точність; стабільність траєкторії при динамічних навантаженнях; наявність засобів калібрування; наявність сенсорних або адаптивних систем корекції; придатність до застосування в роботизованому зварюванні. Для забезпечення коректності інтерпретації враховували, що паспортні характеристики роботів можуть бути отримані за різних умов випробувань, тому вони використовувалися переважно для якісного і відносного порівняння технологічних підходів.

Дослідження включало такі етапи. На першому – проводили відбір і змістовий аналіз джерел за напрямками, пов'язаними з точністю позиціонування у зварювальних процесах. На другому –

здійснювали класифікацію чинників впливу на точність із поділом на кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. На третьому етапі виконували порівняння технічних рішень різних виробників і визначали їх функціональну роль у компенсації відповідних складових похибки. На четвертому – узагальнювали результати у вигляді аналітичної схеми формування сумарної похибки позиціонування.

Пошук джерел здійснювали у за офіційною технічною документацією ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa та міжнародними стандартами, зокрема ISO 9283:2020. До аналізу включали рецензовані публікації, стандарти й офіційні технічні матеріали, що містили дані про повторюваність, абсолютну точність, калібрування, відстеження шва, теплові або динамічні чинники похибки в промислових роботах для зварювання. Для коректності порівняння дані інтерпретували з урахуванням класу робота, способу зварювання, вантажопідйомності, досяжності та умов випробувань; за відсутності однакових умов вимірювання результати використовували переважно для якісного і структурного порівняння технічних підходів. Висновки дослідження поширюються насамперед на промислові роботизовані системи дугового, лазерного та контактного точкового зварювання серійного виробництва.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що при підвищенні температури на 10-30°C у зоні зварювання відбувається теплове розширення як деталі, так і елементів оснащення, що може призводити до зміщення траєкторії на 0,1-0,5 мм залежно від довжини робочого плеча маніпулятора. Узагальнення експериментальних даних, представлених у роботах [10, 12], дозволяє встановити майже лінійну залежність між температурою та відхиленням TCP, що підтверджує необхідність застосування температурної компенсації в режимі реального часу. Таким чином, дослідження базується на узагальненні та системному аналізі літературних джерел і технічної документації провідних виробників. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на узагальненні сучасних наукових публікацій, технічної документації та стандартів у галузі промислової робототехніки.

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу необхідно чітко розмежовувати два фундаментальні кінематичні параметри: повторюваність та абсолютну точність позиціонування. Традиційно виробники робототехніки вказують у специфікаціях саме повторюваність – здатність маніпулятора багаторазово повертатися в одну й ту саму фізично запрограмовану точку простору. У передових сучасних моделей цей показник сягає значень від $\pm 0,02$ до $\pm 0,08$ мм. Однак при впровадженні сучасних методів офлайн-програмування коли траєкторія генерується безпосередньо з CAD-моделі деталі на комп'ютері і передається в контролер робота, на перший план виходить абсолютна точність. Вона визначає відхилення реального положення інструмента від заданих математичних координат. Без застосування спеціальних методів калібрування абсолютна похибка стандартного промислового робота може становити від 1 до 5 міліметрів через мікроскопічні відхилення у розмірах ланок, люфти в редукторах та пружні деформації конструкції. Тому передові виробники впроваджують складні апаратно-програмні комплекси для підвищення саме абсолютної точності.

Наведені в табл. 1 дані показують, що провідні виробники реалізують підвищення точності позиціонування різними шляхами: через точніше керування траєкторією, заводське або прикладне калібрування, сенсорну корекцію шва в реальному часі та конструктивне зменшення зовнішніх збурень від кабельних пакетів. Тому при виборі роботизованого комплексу для зварювання доцільно порівнювати не лише паспортні точнісні показники, а й те, яким саме способом виробник забезпечує абсолютну точність, точність шляху та процесну адаптацію до реальної геометрії стику.

Таблиця 1 – Порівняння підходів до забезпечення точності позиціонування в роботизованому зварюванні у провідних виробників

Виробник	Ключове технологічне рішення	Основний принцип дії	Яку складову точності посилює передусім	Практичне значення для зварювання
ABB	TrueMove, QuickMove, AbsoluteAccuracy	TrueMove забезпечує точніше ведення траєкторії, QuickMove підвищує динамічну ефективність руху, AbsoluteAccuracy	Точність траєкторії, динамічна стабільність, абсолютна точність	Доцільно для процесів, де важливі безперервний рух пальника, OLP і зменшення

		зменшує розбіжність між реальною та офлайн-моделлю робота		похибки між віртуальною та реальною траєкторією
KUKA	PathMode, absolutely accurate calibration, hollow-wrist ARC-конфігурації	Поєднання заводського/прикладного калібрування з режимом підвищеної точності безперервного руху	Абсолютна точність і точність ведення шляху	Ефективно для дугового зварювання складних контурів, де критичні безперервність руху та стабільність орієнтації пальника
FANUC	iRVision, SeamTracking, TAST, hollowwrist, advancedmotioncontrol	Комбінація базової повторюваності робота з візуальною та процесною корекцією траєкторії у реальному часі	Повторюваність, процесна корекція, точність відносно реального стику	Особливо корисно в умовах варіативної геометрії деталей і потреби в адаптації до зміщення шва
Yaskawa Motoman	MotoCalV-EG, thru-arm / symmetricwrist ARC-роботи, MotoSim EG	Калібрування абсолютного положення, TCP і орієнтації інструмента; конструкція thru-arm зменшує кабельні збурення; OLP уточнюється через калібрування і симуляцію	Абсолютна точність, точність TCP, точність OLP	Доцільно для високоточного дугового зварювання, де важливі доступність у вузьких зонах, зменшення зносу кабелів і точна відповідність між моделлю та реальним роботом

Для кількісної оцінки ефективності наведених вище технологій доцільно розглянути заявлені виробниками параметри точності (табл. 2). Дані узагальнено за даними технічної документації виробників (ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa). Параметри показують, що виробники подають точнісні характеристики неуніфіковано: у відкритих джерелах зазвичай прямо наводиться повторюваність, тоді як абсолютна точність забезпечується окремими опціями калібрування, програмними засобами корекції або спеціалізованими конфігураціями для зварювання. Тому пряме зіставлення роботів лише за одним числовим показником є методично обмеженим; коректніше одночасно враховувати клас робота, вантажопідйомність, досяжність і те, чи стосується наведена характеристика базового режиму, чи режиму з додатковим калібруванням.

Таблиця 2 – Приклади моделей/класів промислових роботів для зварювання та режим подання точнісних характеристик виробниками

Виробник	Приклад моделі / класу	Основне застосування	Вантажопідйомність, кг	Досяжність, мм	Повторюваність (ISO 9283), мм	Режим подання точності виробником	Коментар для порівняння
ABB	IRB 2600	дугове зварювання, середній клас	20	1850	±0,04	Для моделі у відкритих специфікаціях наведено	Базова повторюваність і засіб покращення

						повторюваність; для підвищення абсолютної точності застосовується опція AbsoluteAccuracy	абсолютної точності подаються окремо
KUKA	KR 6 R1840-2 arc HW / KR CYBERTE CH nano ARC	дугове зварювання	6	1843	±0,04	Для ARC-моделей виробник акцентує PathMode	Виробник позиціонує точність як поєднання геометрично го калібруванн я і точності ведення траєкторії
FANUC	ARC Mate 100iD/8L	дугове зварювання	8	2032	±0,03	У відкритому описі наголошено на точності, і придатності до інтеграції	Для точного порівняння і потрібен datasheet саме цієї моделі
YaskawaMotoman	AR1440	дугове зварювання	12+	1440	не наведено на відкритій сторінці моделі*	Для підвищення абсолютної точності та OLP виробник пропонує MotoCalV-EG	Базові габаритно- кінематичні параметри наведено відкрито, а засіб підвищення абсолютної точності подається окремо

Для ABB IRB 2600 офіційна сторінка моделі вказує 20 кг payload, 1850 мм reach і repeatability 0,04 мм, а окремий матеріал ABB описує Absolute Accuracy як засіб підвищення відповідності між реальним і віртуальним роботом.

Для KUKA KR 6 R1840-2 arc HW офіційна сторінка моделі вказує rated payload 6 кг, maximum reach 1843 мм і pose repeatability 0,04 мм; окремо KUKA для ARC-серії підкреслює absolutely accurate calibration і PathMode.

Для FANUC ARC Mate 100iD/8L офіційна сторінка моделі вказує payload 8 кг, reach 2032 мм, hollow arm/wrist і можливість прокладання seam-tracking/vision cables, але у відкритому фрагменті сторінки числове значення repeatability не наведено.

Для Yaskawa Motoman AR1440 офіційна сторінка моделі вказує payload 12 кг і horizontal reach 1440 мм; Yaskawa також окремо подає MotoCalV-EG як засіб покращення absolute positioning accuracy, TCP, tool posture і OLP accuracy.

З метою узагальнення отриманих результатів доцільно представити класифікацію факторів впливу на точність позиціонування (табл. 3). Дані узагальнено за даними технічної документації виробників (ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa).

Таблиця 3 – Класифікація факторів впливу на точність позиціонування

Група факторів	Конкретні фактори	Характер впливу	Методи компенсації
Кінематичні	люфти, неточності ланок	систематичний	калібрування
Теплові	нагрів, деформації	змінний	температурна компенсація
Динамічні	інерція, вібрації	випадковий	фільтрація, демпфування
Сенсорні	похибки датчиків	випадковий	калібрування сенсорів

Наведені дані, кінематичні показники варіюються залежно від застосованих інженерних рішень. Найвищу повторюваність демонструють роботи FANUC ($\pm 0,03$ мм), що досягається завдяки оптимізованій жорсткості механічних вузлів та інтеграції сенсорних систем. Водночас найкращий показник абсолютної точності забезпечують маніпулятори KUKA (до 0,8 мм) завдяки їхньому фокусу на глибокому індивідуальному калібруванні (опція AbsoluteAccuracy). Моделі ABB та Yaskawa пропонують збалансовані характеристики (абсолютна похибка до 1,0 мм), компенсуючи відхилення за допомогою предиктивних математичних моделей та конструкції з порожнистими валами відповідно. Ці результати підтверджують, що вибір роботизованого комплексу має базуватися на специфіці конкретного завдання: чи є для процесу критичною стабільна повторюваність сотень тисяч однотипних рухів, чи пріоритетом виступає абсолютна відповідність реальної траєкторії офлайн-змодельованій програмі.

На основі узагальнення наведених у табл. 3 чинників доцільно подати інтегровану схему формування сумарної похибки позиціонування та основних засобів її компенсації в роботизованому зварюванні (рис. 1). Такий підхід дає змогу перейти від ізольованого розгляду окремих джерел похибки до їх комплексного оцінювання в межах єдиної логіки аналізу.

Як показано на рис. 1, фактична похибка позиціонування формується під спільним впливом кінематичної, теплової та динамічної складових, а її зменшення потребує поєднання калібрування, поточної компенсації та адаптивної корекції відносно реального стику.

Специфіка порівняльного аналізу полягає також у тому, що різні методи зварювання висувають кардинально різні вимоги до кінематики робота. Найбільш поширене дугове зварювання (MIG/MAG/TIG) вимагає базового позиціонування на рівні $\pm 0,1$ мм. Однак головним викликом тут є температурні деформації зварюваних деталей, які можуть змінювати геометрію стику на міліметри просто під час процесу. Для кількісної оцінки сумарної похибки доцільно використовувати більш узагальнену модель, що враховує незалежність складових похибок:

Для кількіснішого подання результатів узагальненого аналізу доцільно оцінити не лише абсолютні значення окремих складових похибки, а й їхній відносний внесок у сумарну похибку позиціонування. З цією метою були розглянуті два ілюстративні сценарії – помірні умови та інтенсивне зварювання – для яких обчислено частки кінематичної, теплової та динамічної складових у структурі сумарної похибки.

Для наочного оцінювання ролі окремих складових сумарної похибки доцільно використовувати не самі значення E_{kin} , E_{therm} , E_{dyn} , а їх відносний внесок у сумарну похибку, визначений за квадратами складових: $P_{therm} = \frac{E_{therm}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot 100 \%$, $P_{kin} = \frac{E_{kin}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot$

100% , $P_{dyn} = \frac{E_{dyn}^2}{E_{kin}^2 + E_{therm}^2 + E_{dyn}^2} \cdot 100 \%$, що наведено в таблиці 4.

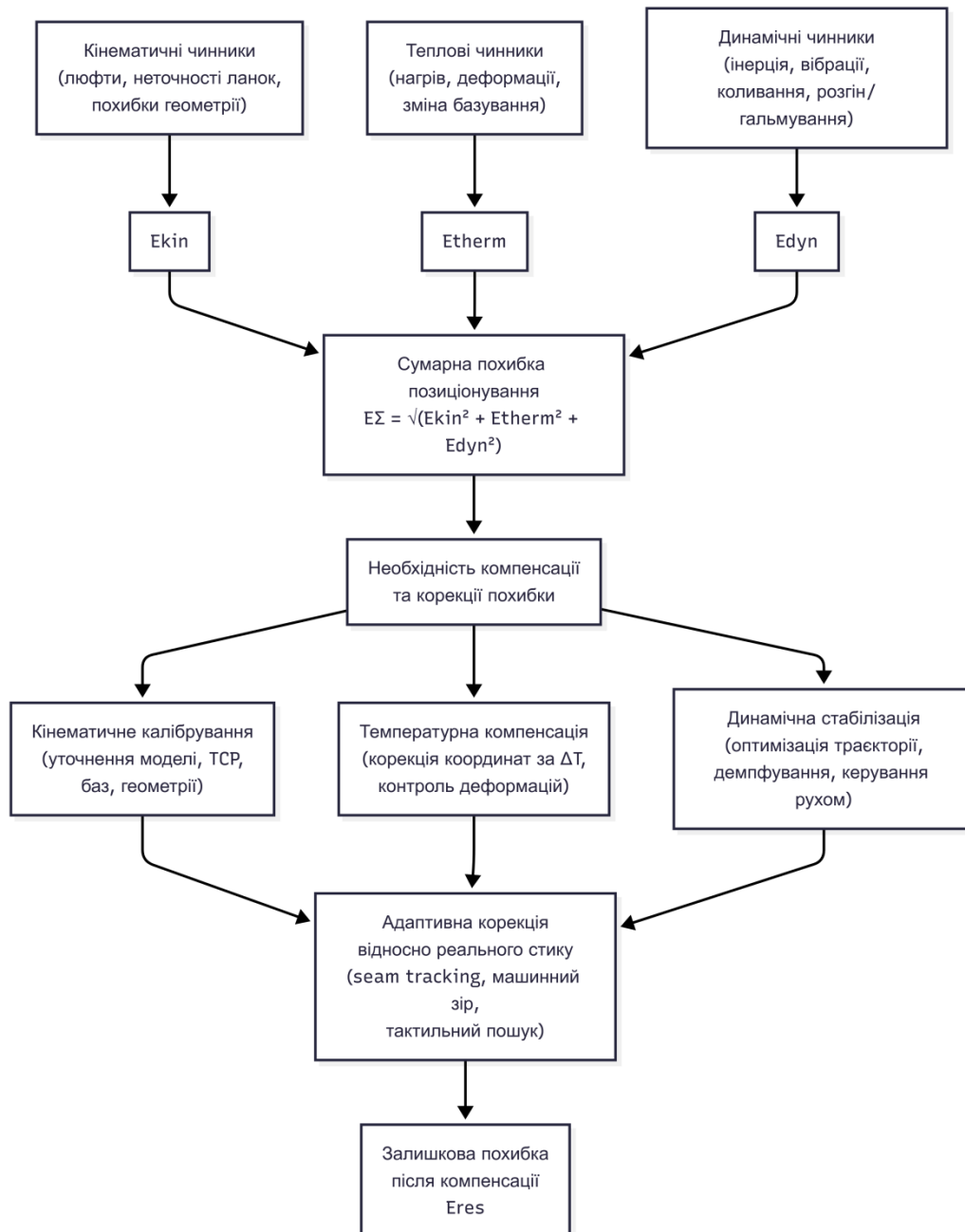


Рисунок 1 – Схема формування сумарної похибки позиціонування промислового робота та основних засобів її компенсації

Таблиця 4 –Відносний внесок кінематичної, теплової та динамічної складових у сумарну похибку позиціонування промислового робота за різних умов зварювання

Сценарій	E_{kin} , мм	E_{therm} , мм	E_{dyn} , мм	E_{Σ} , мм	P_{kin} , %	P_{therm} , %	P_{dyn} , %
Помірні умови	0,05	0,20	0,12	0,24	4,4	70,3	25,3
Інтенсивне зварювання	0,05	0,40	0,30	0,50	1,0	63,4	35,6

Як видно з табл. 4, в обох сценаріях домінуючою є тепла складова похибки, частка якої становить близько 70,3% за помірних умов і 63,4% при інтенсивному зварюванні. Водночас зі зростанням інтенсивності процесу істотно збільшується внесок динамічної складової – з 25,3% до 35,6%, що свідчить про підвищення ролі інерційних навантажень, коливань і швидкісних режимів руху. Частка кінематичної складової в обох випадках є відносно малою, однак вона формує базову межу точності системи й визначає ефективність подальших компенсаційних заходів. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до підвищення точності

позиціонування, за якого поряд із калібруванням необхідно враховувати температурну компенсацію та засоби динамічної стабілізації траєкторії.

$$E = \sqrt{E_{\text{kin}}^2 + E_{\text{therm}}^2 + E_{\text{dyn}}^2} \quad (1)$$

де E_{kin} – кінематична похибка, обумовлена геометричними неточностями ланок та з'єднань маніпулятора; E_{therm} – похибка, спричинена температурними деформаціями робочої зони та конструкції;

E_{dyn} – динамічна похибка, пов'язана з інерційними навантаженнями та вібраціями.

Такий підхід відповідає методології статистичного підсумовування незалежних похибок та дозволяє отримати більш реалістичну оцінку точності позиціонування. Крім того, термічна складова може бути описана залежністю:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (2)$$

де α – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу, L – характерний розмір, ΔT – зміна температури.

Такий підхід дозволяє не лише якісно, але й кількісно оцінювати внесок кожного фактора, що є основою для побудови алгоритмів компенсації у сучасних роботизованих системах. Тому висока точність самого маніпулятора обов'язково повинна доповнюватися адаптивними системами: лазерними 3D-сканерами стику, що йдуть попереду дуги, або тактильними системами пошуку через газове сопло чи сам зварювальний дріт. Для типового промислового робота середнього класу характерні такі значення: $E_{\text{kin}} = 0,05$ мм, $E_{\text{therm}} = 0,2 \dots 0,4$ мм при нагріванні $20-40$ °C; $E_{\text{dyn}} = 0,1 \dots 0,3$ мм при швидкісному переміщенні. Підставляючи середні значення, отримуємо загальну похибку $E \approx 0,24$ мм за помірних умов та $E \approx 0,5$ мм при інтенсивному зварюванні. Це доводить, що температурна складова є домінуючою, і реальна точність може погіршуватись у 5-10 разів порівняно з паспортною повторюваністю, що вимагає застосування систем *SeamTracking* чи тактильного пошуку. На основі узагальнення літературних даних та наведених оцінок було проведено узагальнений розрахунковий аналіз впливу температурного фактора на сумарну похибку позиціонування. Встановлено, що при збільшенні температури робочої зони на $20-40$ °C внесок термічної складової може перевищувати 60% загальної похибки. Це дозволяє зробити висновок про домінуючу роль теплових ефектів у процесах роботизованого зварювання та обґрунтовує необхідність застосування систем температурної компенсації в режимі реального часу.

Значно жорсткіші вимоги висуваються до роботизованих комплексів лазерного та плазмового зварювання. Діаметр сфокусованого енергетичного променя у цих технологіях часто становить від 0,1 до 0,6 міліметра. Відхилення траєкторії навіть на соті частки міліметра або найменша мікровібрація маніпулятора на високій швидкості призведуть до дефекту – розриву шва або пропалу матеріалу. Для цих завдань обирають спеціалізовані високоточні роботи з мінімальними показниками вібрації та обов'язковою інтеграцією систем коаксіального відеоспостереження, які наводять промінь з мікроскопічною точністю. Окремий і складний випадок представляє собою контактне точкове зварювання, яке є стандартом кузовного виробництва. Головна проблема точності позиціонування тут пов'язана не з мікроскопічними розмірами шва, а з масогабаритними характеристиками інструмента. Сучасні сервопривідні зварювальні кліщі з вбудованими трансформаторами важать від 100 до 150 кг і створюють значні інерційні навантаження під час швидких переміщень між точками. Порівняльний аналіз показує, що для забезпечення точності в таких умовах контролери роботів використовують складні алгоритми гасіння залишкових коливань. Це дозволяє масивному маніпулятору швидко зупинитися в заданій координаті без паразитного розгойдування, що забезпечує ідеальне позиціонування електродів і точне програмування зусилля їх стискання синхронно з подачею струму.

Узагальнення літературних даних свідчить, що практична ефективність роботизованого зварювання визначається здатністю системи забезпечувати стабільне ведення інструмента, відтворюваність траєкторії та адаптацію до відхилень реального стику. Це досягається поєднанням базової точності механічної системи, калібрування, алгоритмів керування рухом і сенсорної корекції в режимі реального часу. За таких умов підвищення якості зварного з'єднання пов'язане не з окремим технічним рішенням, а з узгодженою роботою кінематичних, керувальних і вимірювальних підсистем роботизованого комплексу. Сучасним напрямом розвитку є інтеграція технологій штучного інтелекту та цифрових двійників. Використання цифрових двійників дозволяє здійснювати попередню валідацію траєкторій та корекцію похибок ще на етапі моделювання, що значно підвищує абсолютну точність при OLP. Алгоритми машинного навчання, у свою чергу, застосовуються для адаптивної

корекції параметрів зварювання в режимі реального часу, що дозволяє компенсувати невизначеності середовища та підвищити стабільність якості шва.

Результати узагальнення літературних джерел свідчать про те, що традиційне орієнтування виключно на показник повторюваності є недостатнім для сучасних виробничих умов. Встановлено, що в умовах реального зварювального виробництва визначальну роль відіграє абсолютна точність, яка залежить від комплексного впливу температурних, динамічних та кінематичних факторів. Порівняльний аналіз показав, що сучасні виробники застосовують різні підходи до вирішення цієї проблеми – від механічної жорсткості до інтелектуальних систем компенсації. Тому, перспективним напрямом є комбінування калібрування, сенсорних систем та алгоритмів адаптивного керування. Останні дослідження (2023–2025 р.) демонструють активне впровадження методів штучного інтелекту у задачі роботизованого зварювання. Зокрема, застосування алгоритмів глибинного навчання для обробки зображень зварювальної ванни дозволяє здійснювати адаптивну корекцію траєкторії в режимі реального часу. Крім того, інтеграція комп'ютерного зору та нейронних мереж забезпечує підвищення точності позиціонування в умовах невизначеності геометрії деталей, що є одним із ключових напрямів розвитку сучасних кіберфізичних виробничих систем.

ВИСНОВКИ

На основі узагальнення наукових джерел і технічних матеріалів встановлено, що точність позиціонування промислових роботів у зварювальних операціях визначається не окремим показником, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик, серед яких ключовими є повторюваність, абсолютна точність і стабільність траєкторії в умовах дії технологічних збурень. Для сучасних роботизованих зварювальних систем, особливо при використанні офлайн-програмування, вирішального значення набуває саме абсолютна точність, а не лише паспортна повторюваність.

Систематизовано основні чинники, що зумовлюють відхилення траєкторії інструмента під час зварювання, та показано доцільність їх поділу на чотири групи: кінематичні, теплові, динамічні та сенсорні. Встановлено, що в умовах реального зварювального процесу тепла складова часто є однією з домінуючих, оскільки нагрів робочої зони, оснащення та елементів робототехнічної системи може істотно погіршувати фактичну точність позиціонування порівняно з паспортними значеннями.

Порівняльний аналіз підходів провідних виробників показав, що підвищення точності позиціонування забезпечується різними, але функціонально взаємодоповнювальними інженерними рішеннями, зокрема кінематичним калібруванням, алгоритмами динамічної компенсації руху, підвищенням конструктивної жорсткості, застосуванням машинного зору та систем адаптивного відстеження шва. Це свідчить, що ефективність роботизованого комплексу у зварюванні визначається не окремим заявленим параметром, а узгодженістю механічних, керувальних і сенсорних засобів компенсації похибок.

Обґрунтовано доцільність комплексного підходу до оцінювання точності позиціонування, за якого сумарна похибка розглядається як результат спільного впливу кінематичних, теплових і динамічних складових. Практично це означає, що для підвищення якості роботизованого зварювання найбільш обґрунтованим є поєднання кінематичного калібрування, засобів динамічної стабілізації, температурної компенсації, сенсорного відстеження шва та попередньої валідації траєкторій у цифровому середовищі.

У межах виконаного аналітичного огляду узагальнено та систематизовано чинники, що впливають на точність позиціонування промислових роботів при виконанні зварювальних операцій, а також уточнено підхід до інтерпретації сумарної похибки як результату суперпозиції кінематичної, теплової та динамічної складових. Це дає підстави розглядати комплексне врахування зазначених факторів як методичну основу для обґрунтованого вибору, налаштування та модернізації роботизованих зварювальних комплексів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55. P. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
2. Nubiola, A., Bonev, I.A. (2014). Absolute calibration of industrial robots using a single telescoping ballbar. *Precision Engineering*, 38(3). P. 472-480. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.01.001>
3. Dong, W., Li H., Teng X. (2007). Off-line programming of Spot-weld Robot for Car-body in White Based on Robcad. *Mechatronics and Automation*, 2007. ICMA 2007. P. 1109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303640>

- 4.Hao, L.,Wang, H.,Shen,Y., Wang, X.,Xu, K. (2023) A novel multi-seamextraction method for structured weldments with medium-thick platesbased on DLP vision.*Measurement*, 223. P. 113808. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113808>
- 5.Gao, G., Li, Yu., Liu, F., Han,Sh. (2021).Kinematic Calibration of Industrial Robots Based on DistanceInformation Using a Hybrid Identification Method. *HindawiComplexity*, 2021, ID 8874226, 10 p.<https://doi.org/10.1155/2021/8874226>
- 6.Huliieva, N.M., Somov, D.O., Pasternak, V.V., Samchuk, L.M., Chetverzhuk, T.I. (2020).The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>
- 7.Huliieva, N., Lishchyna, N., Pasternak, V., Huliieva, Z. (2025).Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I OchronieŚrodowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
- 8.Zhao, P.(2023). Design of an arc welding robot monitoring system based on voice integrated circuit*International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(2), P. 756-764. <https://www.scopus.com/pages/publications/85123882903>
- 9.Jing,H.,Ma,X.,Chen,M.,Xing,H.,Tan,J., Chen,J.(2025).Kinematic Parameter Identification for Space Manipulators Using a Hybrid PSO-LM Optimization Algorithm. *Aerospace* 2025, 12(11).P. 1006.<https://doi.org/10.3390/aerospace12111006>
- 10.Kluz, R., Kubit, A.,Trzepieciniski, T. (2018). Investigations of temperature-induced errors in positioning of an industrial robot arm. *J.Mech.Sci.Technol*. 32.P. 5421-5432 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1040-9>
- 11.ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. [https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en] (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>)
- 12.Zhang, J., Li, P.-H.,Zhang, M.-X.,Shen,K.-H.,Xing, Ya-Z. (2026).A review of algorithms for surface defect detection in welds based on machine learning. *Expert Systems with Applications*, 299(C). P. 130188.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130188>
- 13.Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.[https://surl.li/rfjrfs](<https://surl.li/rfjrfs>)
- 14.Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Проектуванняціловихмеханізмівманіпулювання верстатів нового покоління: навч. посібник. 2-ге вид. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с.[https://surl.li/qknbie](<https://surl.li/qknbie>)
- 15.Придальний Б.І., Яніук Д.В. Вплив упорного обмеження автоматичної подачі довгомірної заготовки на точність її осевого позиціонування в токарному верстаті *BMT*, 2025, 22(2).С. 71-80.<https://doi.org/10.31649/2413-4503-2025-22-2-71-80>

REFERENCE

- 1.Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. (2018).Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55. P. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- 2.Nubiola, A., Bonev, I.A. (2014).Absolute calibration of industrial robots using a single telescoping ballbar. *Precision Engineering*,38(3).P. 472-480.<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.01.001>
- 3.Dong,W., Li H., TengX. (2007).Off-line programming of Spot-weld Robot for Car-body in White Based on Robcad. *MechatronicsandAutomation*, 2007. ICMA 2007.P. 1109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303640>
- 4.Hao, L., Wang, H., Shen,Y., Wang, X., Xu, K. (2023) A novel multi-seamextraction method for structured weldments with medium-thick platesbased on DLP vision.*Measurement*, 223. P. 113808. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113808>
- 5.Gao, G., Li, Yu., Liu, F., Han,Sh. (2021).Kinematic Calibration of Industrial Robots Based on DistanceInformation Using a Hybrid Identification Method. *HindawiComplexity*, 2021, ID 8874226, 10 p.<https://doi.org/10.1155/2021/8874226>
- 6.Huliieva, N.M., Somov, D.O., Pasternak, V.V., Samchuk, L.M., Chetverzhuk, T.I. (2020).The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>

- 7.Huliieva, N., Lishchyna, N., Pasternak, V., Huliieva, Z. (2025).Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
- 8.Zhao, P.(2023). Design of an arc welding robot monitoring system based on voice integrated circuit *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(2), P. 756-764. <https://www.scopus.com/pages/publications/85123882903>
- 9.Jing,H., Ma,X.,Chen,M.,Xing,H.,Tan,J., Chen,J.(2025).Kinematic Parameter Identification for Space Manipulators Using a Hybrid PSO-LM Optimization Algorithm. *Aerospace* 2025, 12(11).P. 1006.<https://doi.org/10.3390/aerospace12111006>
- 10.Kluz, R., Kubit, A., Trzepieciniski, T. (2018). Investigations of temperature-induced errors in positioning of an industrial robot arm. *J. Mech. Sci. Technol.* 32.P. 5421-5432 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1040-9>
- 11.ISO 9283:1998.Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. [https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en] (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>)
- 12.Zhang, J., Li, P.-H., Zhang, M.-X., Shen,K.-H., Xing, Ya-Z. (2026).A review of algorithms for surface defect detection in welds based on machine learning. *Expert Systems with Applications*, 299(C). P. 130188.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130188>
13. Kuznetsov,Yu.M., Prydalnyi, B.I. (2016).Drives of clamping mechanisms of metalworking machines: monograph. Lutsk: Vezha-Druk, 352 p. [https://surl.li/rfjrfs](<https://surl.li/rfjrfs>)
14. Kuznetsov,Yu.M., Prydalnyi, B.I. (2014).Design of target manipulation mechanisms of new generation machines: textbook. 2nd ed. Lutsk: Vezha-Druk, 428 p. [https://surl.li/qknbie](<https://surl.li/qknbie>)
15. Prydalnyi, B.I., Yanyuk, D.V. (2025).Influence of persistent limitation of automatic feed of a long workpiece on the accuracy of its axial positioning in a lathe. *VMT*, 22(2). P. 71-80.<https://doi.org/10.31649/2413-4503-2025-22-2-71-80>

L. Samchuk, B. Prydalnyi, N. Huliieva, V. Sychuk. Analytical review of approaches to ensuring positioning accuracy of industrial robots in welding operations

The article summarizes modern approaches to ensuring the accuracy of positioning of industrial robots in robotic welding. The purpose of the work is a comparative analysis of the repeatability and absolute accuracy of manipulators, as well as factors that determine the deviation of the tool trajectory in real conditions of the welding process. The study is of a review-analytical nature and is based on a systematic analysis of scientific publications, international standards and open technical documentation of leading manufacturers of industrial robots. It is shown that the passport repeatability does not fully reflect the actual welding accuracy, since the real TCP displacement is formed under the combined influence of kinematic, thermal, dynamic and sensor factors. The main sources of error are systematized and the feasibility of dividing them into four groups is established: kinematic, thermal, dynamic and sensor. A generalization of the literature data showed that an increase in temperature in the welding zone by 10-30 °C can cause a shift in the tool trajectory by 0.1-0.5 mm, depending on the length of the manipulator working arm. Within the framework of the generalized computational analysis, it is shown that under moderate conditions the total positioning error can be about 0.24 mm, and during intensive welding it can increase to about 0.50 mm, with the share of the thermal component being one of the dominant ones. The technical solutions used by leading manufacturers are analyzed, in particular kinematic calibration, dynamic motion compensation algorithms, machine vision, adaptive seam tracking and digital trajectory verification. It is substantiated that the most appropriate approach for increasing positioning accuracy is a comprehensive approach that combines calibration, sensor correction, temperature compensation and digital means of process validation. The obtained generalizations can be used for a well-founded choice of technical solutions during the design, configuration, and modernization of robotic welding complexes.

Keywords: automatic control; mechatronic robot drives; robotic equipment service; influence of thermal effects, design of processing equipment.

САМЧУК Людмила Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: Samchuk204@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

ПРИДАЛЬНИЙ Борис Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної

механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-8565-5986>

ГУЛІЄВА Наталія Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:n.huliieva@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-9282-4880>

СИЧУК Віктор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail:v.sychuk@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-8267-0846>

Liudmyla SAMCHUK – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:Samchuk204@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

Borys PRYDALNYI – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:b.prydalnyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-8565-5986>

Nataliia HULIEVA – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:n.huliieva@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-9282-4880>

Viktor SYCHUK – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail:v.sychuk@lntu.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-8267-0846>

Дата надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/2zmnscs77>

Сахно В.П.¹, Маяк М.М.², Хорошун Р.В.³, Котенко А.С.²¹Національний транспортний університет, м. Київ, Україна²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна³Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, м. Тернопіль, Україна**ВПЛИВ ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ПРИЧЕПА ШАРНІРНО-З'ЄДНАНОГО АВТОБУСА
НА ЙОГО СТІЙКІСТЬ РУХУ**

З огляду на інтенсивне зростання кількості транспортних засобів у великих містах, що спричиняє ускладнення функціонування системи пасажирських перевезень, особливої актуальності набуває проблема її вдосконалення. Ключовим напрямом у цьому контексті є зниження навантаження на міську вулично-дорожню мережу.

У проведеному дослідженні основна увага приділена можливому зміщенню центру мас причіпної ланки при значному наповненні пасажирами кузовів автобуса і причепа у часи пік, що може призвести до погіршення стійкості руху ШЗА. При цьому встановлено, що наявність ексцентриситету центру мас причепа призводить до неоднозначного його впливу на кути відведення і складання автопоїзда. При зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра його повороту кути відведення і складання збільшуються у порівнянні з симетричним завантаженням причепа ($\epsilon=0$) і навпаки - при зсуві центра мас причепа у внутрішню щодо миттєвого центра його повороту сторону ці кути зменшуються. Такий характер зміни кутів відведення і складання призводить майже до аналогічної зміни кутової і бічної швидкості і бічного прискорення центру мас причепа. Проте за будь якого зміщення центру мас причепа за швидкості 10 м/с ШЗА залишається стійким. Збільшення швидкості автопоїзда призводить до погіршення стійкості руху і за ексцентриситету центру мас $\epsilon=0,2$ автопоїзд знаходиться на межі стійкості (допустиме прискорення центру мас не повинно перевищувати 0,45g).

На відміну від перехідних режимів руху (вхід в поворот, переставка), у стаціонарних режимах руху (прямолінійний рух) за наявності ексцентриситету критична швидкість зменшується незалежно від напрямку зміщення. Так, за відсутності ексцентриситету критична швидкість складала $V_{\epsilon=0}=28,12$ м/с, при зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра його повороту $V_{\epsilon=0,2}=23,95$ м/с, м/с, при зсуві центра мас причепа у внутрішню щодо миттєвого центра його повороту $V_{\epsilon=0,2}=24,89$ м/с. Це необхідно враховувати при завантаженні причепа.

Ключові слова: шарнірно-з'єднаний автобус (ШЗА), причіп, ексцентриситет, центр мас, математична модель, стійкість, критична швидкість.

ВСТУП

У сучасних умовах функціонування транспортних систем мегаполісів спостерігається суттєве ускладнення ситуації у сфері пасажирських перевезень, що зумовлено стрімким зростанням кількості транспортних засобів на вулично-дорожній мережі. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема підвищення ефективності організації перевезень, зокрема шляхом зниження транспортного навантаження та розвантаження міських вулиць.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є впровадження сучасних автобусів особливо великого класу, за умови забезпечення їх гармонійної інтеграції в транспортний потік без створення додаткових перешкод. У цьому контексті першочергового значення набувають питання вибору, аналізу та наукового обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів автобуса та причіпної секції (далі – ШЗА), які забезпечують безпечність та ефективність їх руху.

Водночас експлуатаційні чинники, що проявляються під час руху ШЗА в реальних дорожніх умовах, значно ускладнюють задачу визначення його раціональних компонувальних параметрів при забезпеченні необхідних показників маневреності та стійкості. Особливої складності набуває оцінювання стійкості руху, що пов'язано з необхідністю врахування значної кількості змінних параметрів, зокрема ступеня завантаження автобуса і причіпної секції, характеру розміщення пасажирів, можливого зміщення центру мас у поперечній площині, а також відведення коліс осей. У зв'язку з цим виникає потреба у формуванні обґрунтованої постановки задачі дослідження.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових праць, присвячених дослідженню стійкості автомобілів і автопоїздів, свідчить про відсутність єдиного підходу як до побудови математичних моделей, так і до вибору методів їх аналізу [1]. Додатково задача ускладнюється необхідністю врахування впливу конструктивних параметрів і експлуатаційних режимів на показники маневреності та стійкості руху автобусів особливо великого класу за різних схем прикладання тягового зусилля – на вісь першої або другої ланки. Теоретичні основи дослідження ґрунтуються на математичних

моделях прямолінійного та керованого руху автомобілів і автопоїздів [2], однак їх застосування потребує уточнення з урахуванням різноманіття компоновальних схем, варіативності навантажень і особливостей систем керування.

Таким чином, виникає науково-прикладна проблема прогнозування показників маневреності та стійкості руху шарнірно-зчленованих автобусів, що й обумовлює актуальність даного дослідження.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Забезпечення належного рівня керованості та стійкості автотранспортних засобів (АТЗ) у всіх режимах руху є однією з ключових задач як на етапі їх проектування, так і в процесі експлуатації. З цією метою здійснюється визначення характеристик власних рухів АТЗ і зовнішніх збурювальних впливів, а також встановлення граничних умов, що визначають можливість безпечного руху з урахуванням ризиків заносу, перекидання тощо [3]. Як показано в роботі [4], практично всі конструктивні та експлуатаційні параметри автомобіля і причіпних ланок чинять суттєвий вплив на показники його керованості та стійкості.

Ефективність розв'язання задачі забезпечення стійкості руху значною мірою залежить від адекватного вибору розрахункової схеми, яка має максимально точно відображати ключові фактори, що визначають цю експлуатаційну характеристику, а також від точності оцінювання сил взаємодії пневматичних шин із дорожнім покриттям [5, 6].

Під час розроблення математичної моделі для дослідження керованості та стійкості руху АТЗ необхідно враховувати вимогу її максимальної відповідності реальним умовам функціонування транспортного засобу. Оскільки АТЗ є складною технічною системою, що включає значну кількість взаємопов'язаних вузлів, агрегатів і механізмів, з'єднаних голономними та неголономними зв'язками і характеризується великою кількістю ступенів свободи, її опис потребує використання систем диференціальних рівнянь високого порядку.

Дослідження [7] свідчать, що вантажні причіпні автопоїзди схильні до виникнення нестійких режимів руху на високих швидкостях, що може призводити до складання ланок, розгойдування причепа та навіть перекидання. Водночас при малих швидкостях спостерігається недостатній рівень маневреності. Це обумовлює необхідність пошуку оптимального співвідношення між маневреністю, стійкістю та швидкісними параметрами руху АТЗ.

У роботі [8] запропоновано систему диференціальних рівнянь плоскопаралельного руху для оцінювання показників маневреності та стійкості, однак їх застосування обмежується умовами прямолінійного руху. Для аналізу поведінки автопоїзда у перехідних режимах необхідне використання більш складних математичних моделей. Разом із тим, як зазначено у [6], надмірне ускладнення моделей не завжди є доцільним, оскільки зростання кількості рівнянь потребує розширення набору вихідних параметрів (маси, моментів інерції, характеристик розміщення вантажу, параметрів взаємодії шини з дорожнім покриттям тощо), визначення яких супроводжується похибками, що негативно впливають на точність кінцевих результатів.

У зв'язку з цим при дослідженні впливу конструктивних та експлуатаційних чинників, зокрема зміщення центру мас ланок АТЗ, на стійкість руху дедалі ширше застосовуються спрощені плоскі моделі з урахуванням нелінійних характеристик відведення коліс.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження впливу зміщення центру мас причіпної ланки у поперечній площині на показники стійкості руху шарнірно-зчленованого автобуса (ШЗА).

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення таких наукових завдань:

- удосконалити математичну модель ШЗА з урахуванням поперечного зміщення центру мас причіпної секції;
- визначити показники стійкості ШЗА у перехідних режимах руху з урахуванням зміщення центру мас причепа;
- визначити критичну швидкість ШЗА у прямолінійному русі руху з урахуванням зміщення центру мас причепа і фактори, що на неї впливають.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводимо на базі шарнірно-з'єданого дизельного автобуса Otocar DRIVE 18 з двигуном, розташованим у причіпній секції, і приводом на вісь причепа [9].

У процесі експлуатації шарнірно-з'єднаних автобусів досить важко забезпечити симетричність навантажень для правого й лівого бортів, що приводить до ексцентриситету центра мас й істотній зміні параметрів його руху..

Дослідимо плоскопаралельний рух одноколіїної (велосипедної) моделі, шарнірно-з'єднаного автобуса (ШЗА), рис.1.

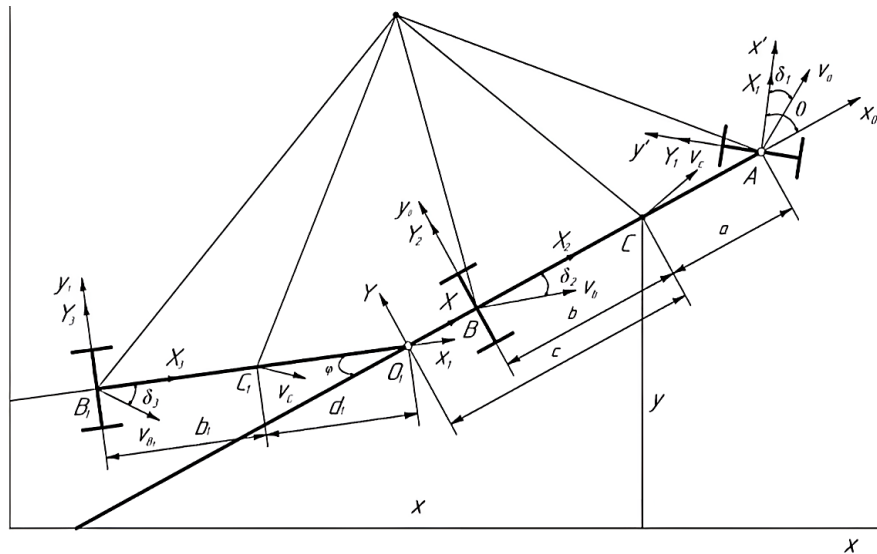


Рисунок 1 – Схема повороту шарнірно-з'єднаного автобуса [2]

Диференціальні рівняння плоскопаралельного руху ШЗА [3] доповнені урахуванням ексцентриситету центру мас причепа і записані у вигляді:

- для поздовжньої швидкості центру мас автомобіля v

$$(m + m_1)\dot{v} - m_1(d_1 \sin \phi + \varepsilon)\dot{\omega} + m_1 d \sin \phi \ddot{\phi} = (m_1 + m)\omega u - m_1 c \omega^2 - m_1 d_1 \cos \phi \times (\omega - \phi)^2 + X_1 \cos \theta - Y_1 \sin \theta + X_2 + X_3 \cos \phi + Y_3 \sin \phi; \quad (1)$$

- для поперечної швидкості центру мас автомобіля u

$$(m + m_1)\dot{u} - m_1(c_1 + d_1 \cos \phi + \varepsilon_1 \sin \phi)\dot{\omega} + m_1 d_1 \cos \phi \ddot{\phi} = -(m_1 + m)\omega v + m_1 \varepsilon \omega^2 + m_1(d_1 \sin \phi - \varepsilon \cos \phi) \times (\omega - \phi)^2 + X_1 \sin \theta + Y_1 \cos \theta + Y_2 - X_3 \sin \phi + Y_3 \cos \phi; \quad (2)$$

- для кутової швидкості автомобіля ω

$$\{I + m_1[c^2 + \varepsilon^2 + c d_1 \cos \phi]\} \dot{\omega} - m_1 \varepsilon \dot{v} - m_1 c \dot{u} - m_1 c d_1 \cos \phi \ddot{\phi} = [m_1 c v \omega - m_1 \varepsilon u \omega - m_1 c d_1 \times \sin \phi] \times (\omega - \phi)^2 + X_1 a \sin \theta + Y_1 a \cos \theta - Y_2 b + X_3(c \sin \phi - \varepsilon \cos \phi) - Y_3(c \cos \phi + \varepsilon \sin \phi); \quad (3)$$

- для кута складання автопоїзда ϕ

$$m_1 d_1^2 \ddot{\phi} - [I_1 + m_1(d_1^2 + \varepsilon d_1 \sin \phi)] \dot{\omega} + m_1 d_1 \sin \phi \dot{v} + m_1 d_1 \cos \phi \dot{u} = m_1(d_1 \sin \phi - \varepsilon \cos \phi) \times \omega u - m_1(d \cos \phi + \sin \phi) v \omega - m_1[c d_1 \sin \phi - \varepsilon d_1 \cos \phi] \omega^2 - L_1(X_3 \sin \phi - Y_3 \cos \phi). \quad (4)$$

У рівняннях (1-4) прийняті такі позначення:

m, m_1 – маса автобуса і причепа; $m=18500$ кг, $m_1=11500$ кг;

ε – ексцентриситет центру мас причепа;

X_i, Y_i, Z_i – поздовжні, бокові і вертикальні реакції опірної поверхні на колеса ШЗА ($i=1,2,3$);

I, I_1 – моменти інерції автобуса і причепа щодо вертикальної осі, що проходить через центр мас.

a, b, c, d_1, c_1, l_1 – компонувальні параметри ШЗА, рис.1.

У рівняння (1-4) входять нормальні, поздовжні і бічні реакції на колеса осей ШЗА.

Поздовжні реакції, що діють на колеса ШЗА і причепа визначені як [9]:

- на передню і задню вісь автобуса

$$X_{1,2} = f \times Z_{1,2}, \quad (5)$$

-на вісь причепа

$$X_n = \gamma \times Z_n, \quad (6)$$

де f - коефіцієнт опору кочення;

γ - питома тягова сила;

$Z_{1,2}$ - нормальна реакція опорної поверхні на осі автобуса;

Z_3 – нормальна реакція опорної поверхні на вісь причепа.

Нормальні реакції опорної поверхні у неусталеному русі ШЗА визначені як [10]:

-для осі причепа

$$Z_n = G_n \frac{a_n}{L_n} - P_{cx} \frac{h_c}{L_n}, \quad (7)$$

-для передньої осі автобуса

$$Z_{1a} = \frac{b}{L_a} (G_a - P_{cz} \frac{h_c}{b+c}), \quad (8)$$

- для задньої осі автобуса

$$Z_{2a} = \frac{a}{L_a} (G_a + P_{cz} \frac{h_c}{b+c}), \quad (9)$$

$G_{a,n}$ – сила тяжіння від маси автобуса і причепа, $G_{a,n} = (m + m_1) \times g$, $G_{a,n} = 30000 \times 9,81 = 294300$ Н;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

P_{cx} – зусилля в опорно-зчіпному пристрої;

f – коефіцієнт опору кочення, $f = 0,02$;

P_{cz} – навантаження на опорно-зчіпний пристрій, $P_{cz} = P_{cx} \times \frac{h_c}{L_n}$;

h_c – висота розташування опорно-зчіпного пристрою, $h_c = 0,6$ м;

h_{qn} – висота центру мас причепа, $h_{qn} = 0,95$ м;

h_{qa} – висота центру мас автобуса, $h_{qa} = 0,95$ м;

L_a – база автобуса, $L_a = 5,8$ м;

L_n – база причепа, $L_n = 6,8$ м;

a – відстань від центру мас автомобіля до передньої осі, $a = 3,45$ м;

b – відстань від центру мас автомобіля до задньої осі, $b = 2,35$ м;

a_n – відстань від центру причепа до опорно-зчіпного пристрою, $a_n = 5,8$ м;

c – відстань від центру мас автомобіля до точки зчипки з причепом, $c = 5,25$ м.

Зусилля в опорно-зчіпному пристрої визначаються силами опору руху автобуса:

$$P_{cx} = G_a \times f(v) + k_n \times F \times v^2, \quad (10)$$

де $f(v)$ - коефіцієнт опору кочення коліс автобуса у функції швидкості руху, $f(v) = f_0 + k_f v^2$ [11],

де f_0 – коефіцієнт опору коченню при малій швидкості;

k_f – коефіцієнт, що враховує зміну f_0 у функції швидкості, $k_f = 7 \cdot 10^{-6}$ [10]

k_n – коефіцієнт опору повітря, $k_n = 0,5$ Нс²/м⁴;

F – площа Міделя автобуса, $F = B \times H = 2,25 \times 3,15 = 7,09$ м².

На рис. 2 наведена зміна зусилля в опорно-зчіпному пристрої і реакцій опорної поверхні на осях автобуса і причепа ШЗА за різної швидкості руху.

Аналіз даних, рис. 2, показує несуттєве збільшення реакції на задній осі автобуса (1,89%) і несуттєве зменшення на передній осі автобуса (0,78%) і причепа (1,6%). Пояснюється це дією зусилля у тягово-зчіпному пристрої, рис. 3, яке значно менше навантаження на вісь (за швидкості 5 м/с майже у 15 разів, а за швидкості 30 м/с – майже у 5 разів). Тому у подальших розрахунках зміна навантаження на осі ШЗА не враховувалася і приймалися їх статичні значення.

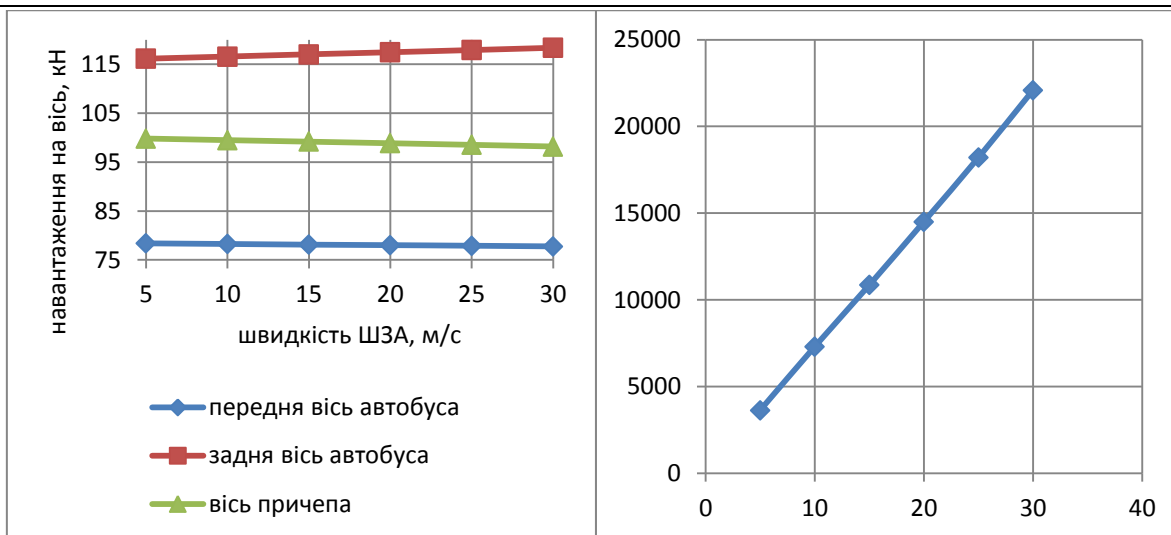


Рисунок 2 – Зміна нормальних реакцій опорної поверхні на осях ШЗА у функції швидкості

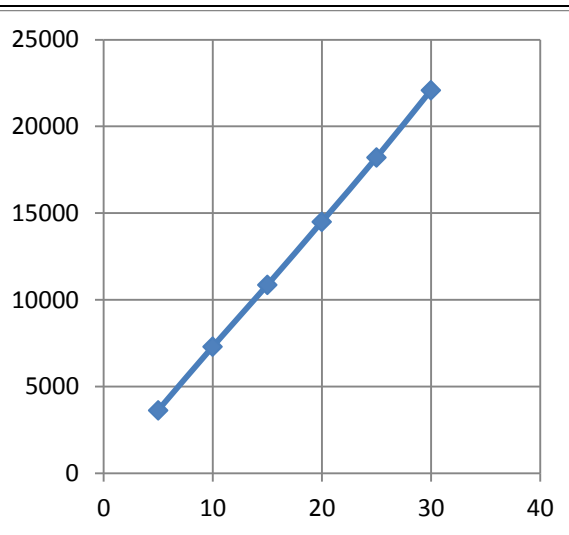


Рисунок 3 – Зміна зусилля в опорно-зчипному пристрої ШЗА у функції швидкості

При визначенні бічних сил на осях ШЗА прийнято, що взаємодія коліс з опорною поверхнею виражається через реакцію полотна дороги, що є функцією кута відведення і крену кузова автомобіля і причепа, а саме [1]

$$Y_i = \frac{k_i \delta_i}{\sqrt{1 + k_i (\phi^2 G_i^2)^{-1} \delta_i^2}}, \quad (11)$$

де δ_i , Y_i – кути відведення та бічні реакції на колесах осей автомобіля і причепа;

G_i – навантаження на i -ту вісь ШЗА ($i=1,2,3$);

ϕ – коефіцієнт зчеплення між шиною і опорною поверхнею в поперечному напрямку (вважаємо ϕ сталою величиною для заданих дорожніх умов), $\phi=0,6$;

k_i – коефіцієнт опору бічному відведенню, для шин;

$k_2=320000$ Н/рад; $k_3=180000$ Н/рад; $k_4=180000$ Н/рад.

Інтегрування системи рівнянь (1-4) виконано для ШЗА за номінального його навантаження і швидкості 10 м/с при виконанні маневрів «вхід в поворот» і «переставка».

Для комп'ютерного моделювання найбільш типового повороту автопоїзда на 90° , що рухався перед тим прямолінійно, закон управління керованими колесами тягача задається у вигляді [1]:

$$\theta = \begin{cases} \frac{Onpu0 \leq t \leq t_0}{\beta t nput_0 < t \leq t_1} \\ \frac{\beta t_1 nput_1 \leq t \leq t_2}{-\beta t nput_2 < t \leq t_3} \\ \frac{Onput > t_2}{\end{cases}, \quad (12)$$

де $[0; t_0]$ і $[t_3; t_k]$ – час руху автопоїзда по прямій відповідно до входу в поворот і після виходу із повороту;

$[t_0; t_1]$ – інтервал часу входження в поворот, керовані колеса автомобіля-тягача рівномірно повертаються зі швидкістю $\beta = 0,05$ с⁻¹;

$[t_1; t_2]$ – інтервал часу руху автопоїзда по колу (може бути відсутнім);

$[t_2; t_3]$ – інтервал часу виходу автопоїзда із повороту (керовані колеса автомобіля-тягача рівномірно повертаються у нейтральне положення).

Для вивчення поведінки автопоїзда у такому повороті приймалися швидкості 10 м/с за кута повороту керованих коліс тягача від $\theta_0 = 0$ до $\theta = 0,6$ рад (34,5 град).

На рис. 4 наведені залежності кутів відведення коліс осей ШЗА і складання автобуса і причепа на стадії входу ШЗА в поворот за номінального навантаження і різного значення ексцентриситету центру мас причепа.

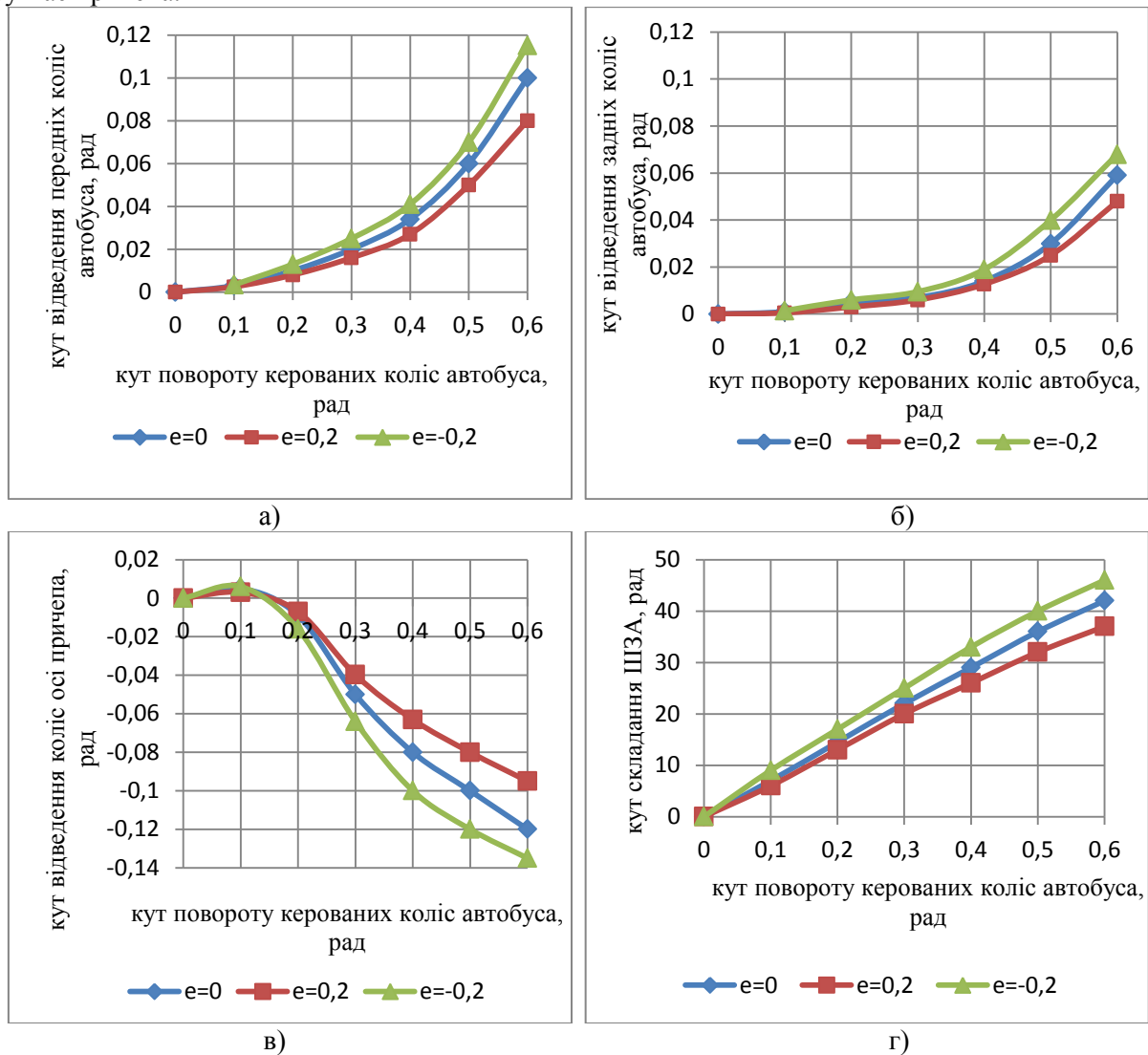


Рисунок 4 – Зміна кутів відведення коліс осей ШЗА у функції кута повороту керованих коліс автобуса і складання його ланок у функції часу перехідного процесу за різного напрямку ексцентриситету центру мас причепа

Такий характер зміни кутів відведення і складання призводить майже до аналогічної зміни кутової і бічної швидкості і бічного прискорення центру мас причепа, рис. 5.

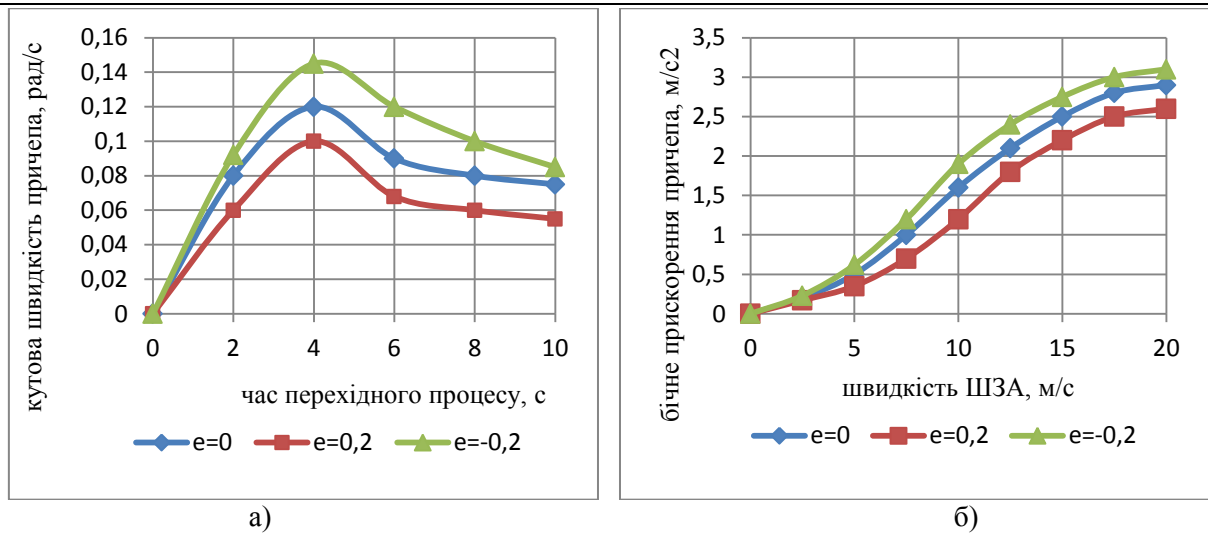


Рисунок 5 – Зміна кутової швидкості причепа у функції часу перехідного процесу (а) і бічного прискорення причепа (б) у функції швидкості руху за різного напрямку ексцентриситету центру мас

При цьому стійкість руху ШЗА за будь якого зміщення центру мас причепа або за його відсутності забезпечується, так як бічна швидкість і бічні прискорення не перевищують максимально допустимі навіть за швидкості автопоїзда 20 м/с (допустиме прискорення центру мас не повинно перевищувати 0,45g).

Більш інформативним при дослідженні стійкості руху автопоїзда є такі перехідні режими як «ривок керма» і «переставка». При виконанні маневру кут повороту керованих коліс автобуса задається у вигляді [1]:

$$\theta_0 := \begin{cases} \frac{\pi t}{10} & -t < 0 \text{ and } t < \frac{10}{3} \\ \frac{\pi}{3} & -t < \frac{-10}{3} \text{ and } t < 7 \\ \frac{\pi}{3} - \frac{\pi(t-7)}{10} & -t < -7 \text{ and } t < \frac{41}{3} \\ -\frac{\pi}{3} & -t < \frac{-41}{3} \text{ and } t < \frac{52}{3} \\ -\frac{\pi}{3} + \frac{\pi(t-\frac{52}{3})}{10} & -t < \frac{-52}{3} \text{ and } t < \frac{62}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

На рис. 6 наведені графіки зміни швидкості ривання і бічного прискорення причепа за різного значення ексцентриситету його центру мас. Як і при «вході в поворот», так і при виконанні маневру «переставка» стійкість руху ШЗА забезпечується, проте при зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра його повороту сторону (вправо при повороті автомобіля вліво й уліво при правобічному повороті автомобіля) швидкість ривання і бічне прискорення збільшуються у порівнянні з симетричним завантаженням причепа ($\epsilon=0$) майже на 25%. При зсуві центра мас причепа у внутрішню щодо миттєвого центра його повороту сторону кути швидкості ривання і бічне прискорення зменшуються майже на 20%.

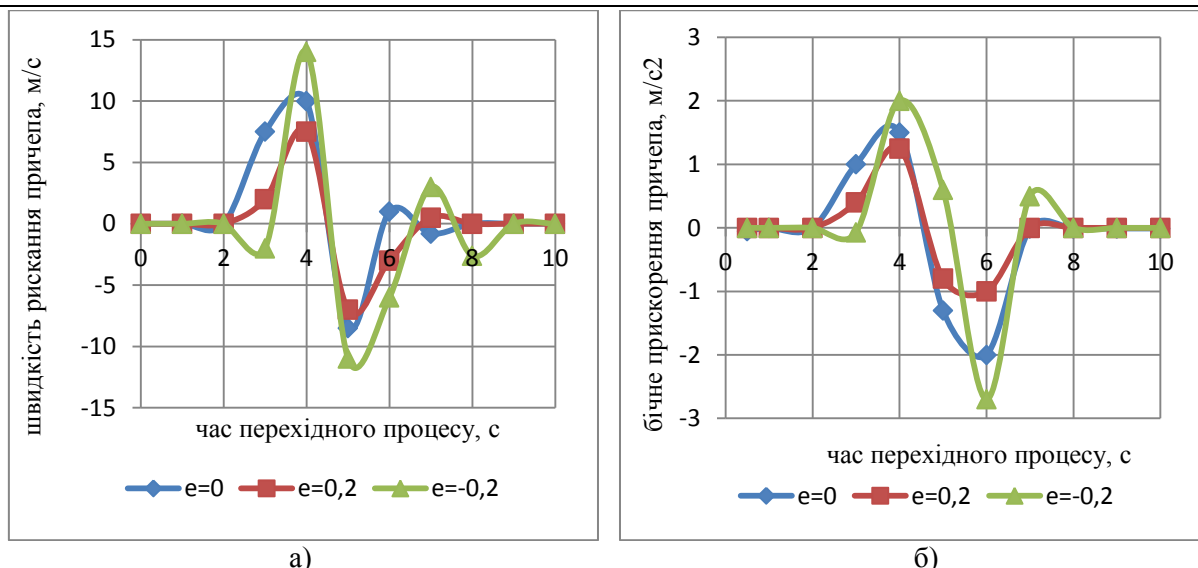


Рисунок 6 – Зміна швидкості рискання (а) і бічного прискорення (б) причепа у функції часу перехідного процесу за різного напрямку ексцентриситету його центру мас

На відміну від перехідних режимів руху (вхід в поворот, переставка), у стаціонарних режимах руху (прямолінійний рух) за наявності ексцентриситету центру мас причепа критична швидкість ШЗА зменшується незалежно від напрямку його зміщення.

Щоб оцінити вплив ексцентриситету центру мас причепа, розглянемо рівняння, яке можна отримати при $c \neq 0$ з (1) і (2), помноживши (1) на c і склавши з (2). Отримаємо:

$$\{I + m_1 \varepsilon d_1 \sin \phi\} \dot{\omega} + m_1 c \dot{u} - m_1 \varepsilon \dot{v} - m_1 \varepsilon d_1 \sin \phi \ddot{\phi} = -m_1 c v \omega + m_1 c \varepsilon \omega^2 - m_1 \varepsilon u \omega +, \quad (14)$$

$$+ m_1 \varepsilon d_1 \cos \phi (\omega - \dot{\phi})^2 + X_1(a + c) \sin \theta + Y_1[(a + c) \cos \theta + \sin \theta] - Y_2(b - c) - \varepsilon X_3.$$

При зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра його повороту (вправо при повороті автомобіля вліво й уліво при правобічному різко звужується. Пояснюється це характером зміни кутів відведення і відповідно бічних реакцій на колесах осей автопоїзда і кута складання його ланок, рис. 3. З рівняння (12) отримаємо фактори від яких залежить критична швидкість руху ШЗА [1]

$$v_{kp} = f(I, m_1, a, c, b, \varepsilon, k_1, k_2), \quad (15)$$

де a, b, c – геометричні параметри ШЗА;

k_1, k_2 – коефіцієнти опору відведення коліс передньої і задньої осі автобуса.

За формулою (13) розрахуємо критичну швидкість прямолінійного руху, яка є оціночним показником стійкості ШЗА, що розглядається. ексцентриситету центру мас $\varepsilon=0$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=-0,8$. Ця швидкість склала $V_{\varepsilon=0}=28,12$ м/с; $V_{\varepsilon=0,8}=24,89$ м/с; $V_{\varepsilon=-0,8}=23,97$ м/с.

На відміну від перехідних режимів руху («вхід в поворот», «переставка»), у стаціонарних режимах руху (прямолінійний рух) за наявності ексцентриситету критична швидкість ШЗА зменшується незалежно від напрямку зміщення.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У сучасних умовах розвитку транспортних систем мегаполісів спостерігається значне ускладнення ситуації у сфері пасажирських перевезень, що зумовлено стрімким зростанням кількості транспортних засобів на вулично-дорожній мережі. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема підвищення ефективності перевезень, зокрема шляхом зменшення транспортного навантаження та розвантаження міських вулиць.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є впровадження сучасних автобусів особливо великого класу за умови їх ефективної інтеграції в транспортний потік без створення додаткових перешкод для руху. Вибір, аналіз і наукове обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів автобуса та причіпної секції (далі – ШЗА) є одним із ключових завдань, оскільки

забезпечення безпечного руху таких транспортних засобів значною мірою визначається їх маневреністю та стійкістю.

Показники маневреності та стійкості ШЗА формуються під впливом характеристик власних рухів автотранспортного засобу, зовнішніх збурювальних факторів, граничних умов безпечного руху, а також конструктивних і експлуатаційних параметрів автомобіля та причіпних ланок, які безпосередньо впливають на його керованість і стійкість.

У проведеному дослідженні основна увага приділена можливому зміщенню центру мас причіпної ланки і його впливу на стійкість руху ШЗА. При цьому встановлено, що наявність ексцентриситету центру мас причепа призводить до неоднозначного його впливу на кути відведення і складання автопоїзда. При зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра його повороту кути відведення і складання збільшуються у порівнянні з симетричним завантаженням причепа ($\varepsilon=0$) і навпаки - при зсуві центра мас причепа у внутрішню щодо миттєвого центра його повороту сторону ці кути зменшуються. Такий характер зміни кутів відведення і складання призводить майже до аналогічної зміни кутової і бічної швидкості і бічного прискорення центру мас причепа. При цьому збільшення швидкості автопоїзда призводить до погіршення стійкості руху і за ексцентриситету центру мас $\varepsilon=0,2$ автопоїзд знаходиться на межі стійкості (допустиме прискорення центру мас не повинно перевищувати $0,45g$).

На відміну від перехідних режимів руху (вхід в поворот, переставка), у стаціонарних режимах руху (прямолінійний рух) за наявності ексцентриситету критична швидкість зменшується незалежно від напрямку зміщення. Це необхідно враховувати при завантаженні причепа.

ВИСНОВКИ

Допрацьована математична модель плоскопаралельного руху ШЗА, що дозволила дослідити вплив ексцентриситету центру мас причепа на показники його стійкості руху.

Встановлено, що наявність ексцентриситету центру мас причепа призводить до неоднозначного його впливу на кути відведення і складання автопоїзда. При зсуві центра мас причепа в зовнішню щодо миттєвого центра ($\varepsilon<0$) його повороту кути відведення і складання збільшуються у порівнянні з симетричним завантаженням причепа ($\varepsilon=0$) і навпаки - при зсуві центра мас причепа у внутрішню щодо миттєвого центра його повороту сторону ($\varepsilon>0$) ці кути зменшуються. Такий характер зміни кутів відведення і складання призводить майже до аналогічної зміни кутової і бічної швидкості і бічного прискорення центру мас причепа. При цьому збільшення швидкості автопоїзда призводить до погіршення стійкості руху і за ексцентриситету центру мас $\varepsilon=0,8$ автопоїзд знаходиться на межі стійкості (допустиме прискорення центру мас не повинно перевищувати $0,45g$).

Визначена критична швидкість прямолінійного руху, яка є оціночним показником стійкості ШЗА, що розглядається. Ця швидкість склала $V_{\varepsilon=0}=28,12$ м/с; $V_{\varepsilon=0,2}=24,89$ м/с; $V_{\varepsilon=-0,2}=23,95$ м/с. Якщо зважити на допустиму швидкість ШЗА в умовах міських перевезень пасажирів ($v \leq 60$ км/год), то можна стверджувати, що стійкість руху забезпечується за будь якого напрямку зміщення центру мас причепа.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сахно В. П. Шарнірно-зчленовані автобуси. Маневреність та стійкість: монографія / В. П. Сахно та ін. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2021. – 288 с.
2. Sakhno, V., Polyakov, V., Murovany, I., Sharai, S., Lyashuk, O., Plekan, U., Tson, O., & Sokol, M. (2023). Stability of the Two-Link Metrobus. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 25(2), B77-85. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.023>
3. Сахно В. П. До визначення показників стійкості автопоїзда категорії М1 у перехідних режимах руху / В. П. Сахно, Р. М. Кузнєцов, В. В. Стельмашук, Л. С. Козачук // Сучасні технології в машинобудуванні і транспорті. – Луцьк: Луцький НТУ, 2014. – № 2. – С. 123–128.
4. Сахно В. П. Визначення параметрів стійкості автопоїзда з причепом категорії О2 / В. П. Сахно, В. В. Стельмашук, Р. В. Пазін // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. – Rzeszów, 2018. – С. 93–102.
5. Козачук Л. С. До визначення стійкості руху автопоїзда категорії М1 / Л. С. Козачук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2014.
6. Вербицкий В. Г. Автомобили. Устойчивость: монография / В. Г. Вербицкий, В. П. Сахно, А. П. Кравченко та ін. – Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2013. – 176 с.
7. Islam M. M. Parallel design optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with active safety systems. – Oshawa: University of Ontario Institute of Technology, 2013.

8. Sakhno V., Gerlici J., Poliakov V., Kravchenko A., Omelnitsky O., Lask T. Road train motion stability in BRT system // Machine Modelling and Simulation (MMS 2018): Book of abstracts. – Rydzyna, 2018. – P. 49.

9. Сахно В. П. До порівняльної оцінки шарнірно-зчленованих автобусів з різними силовими установками / В. П. Сахно, М. М. Маяк, А. С. Котенко // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – № 2 (23). – С. 197–207. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1542>.

10. Сахно В. До аналізу процесу гальмування автомобіля з причепом категорії O2 / В. Сахно, В. Онишук, В. Босенко, С. Стельмашук // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2025. – № 2 (25). – С. 254–265. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1934>.

11. Сахно В. П. Експлуатаційні властивості автомобілів. Ч. 1. Динамічність та паливна економічність автотранспортних засобів: навчальний посібник / В. П. Сахно, І. С. Мурований та ін. – Луцьк: Вежа ДРУК, 2025. – 307 с.

REFERENCES

1. Sakhno V. P. et al. (2021). Sharnirno-zchlenuvani avtobusy. Manevrenist ta stiykist. Lutsk: IVV LNTU.

2. Sakhno, V., Polyakov, V., Murovany, I., Sharai, S., Lyashuk, O., Plekan, U., Tson, O., & Sokol, M. (2023). Stability of the Two-Link Metrobus. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 25(2), B77-85. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.023>

3. Sakhno V. P., Kuznietsov R. M., Stelmaschuk V. V., Kozachuk L. S. (2014). Do vyznachennia pokaznykiv stiikosti avtopoizda kategorii M1 u perekhidnykh rezhymakh rukhu. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni i transporti, 2, 123–128.

4. Sakhno V. P., Stelmaschuk V. V., Pazin R. V. (2018). Vyznachennia parametriv stiikosti avtopoizda z pryhepom kategorii O2. Systemy i shrodki transportu samochodowego, 93–102.

5. Kozachuk L. S. (2014). Do vyznachennia stiikosti rukhu avtopoizda kategorii M1. Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu.

6. Verbitsky V. G., Sakhno V. P., Kravchenko A. P. et al. (2013). Avtomobili. Ustoichivost. Lugansk: Knowledge.

7. Islam M. M. (2013). Parallel design optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with active safety systems. Oshawa: University of Ontario Institute of Technology.

8. Sakhno V., Gerlici J., Poliakov V., Kravchenko A., Omelnitsky O., Lask T. (2018). Road train motion stability in BRT system. MMS 2018, 49.

9. Sakhno V. P., Mayak M. M., Kotenko A. S. (2024). Do porivnialnoi otsinky sharnirno-zchlenuvanykh avtobusiv z riznymi sylovymy ustanovkamy. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti, 2(23), 197–207. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1542>

10. Sakhno V., Onyshchuk V., Bosenko V., Stelmaschuk S. (2025). Do analizu protsesu halmuvannia avtomobilia z pryhepom kategorii O2. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti, 2(25), 254–265. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1934>.

11. Sakhno V. P., Murovany I. S. et al. (2025). Ekspluatatsiini vlastyvoli avtomobiliv. Part 1. Lutsk: Vezha-Druk.)

V. Sakhno, M. Mayak, R. Khoroshun, A. Kotenko, The influence of the trailer center of mass displacement on the motion stability of an articulated bus

Given the rapid increase in the number of vehicles in large cities, which complicates the functioning of passenger transport systems, the issue of their improvement has become particularly relevant. A key direction in this context is reducing the load on the urban road network.

The present study focuses on the possible displacement of the center of mass of the trailer unit under conditions of high passenger occupancy in both the bus and trailer bodies during peak hours, which may lead to a deterioration in the motion stability of an articulated bus. It has been established that the eccentricity of the trailer's center of mass results in an ambiguous effect on the slip and articulation angles of the vehicle combination. When the trailer center of mass shifts outward relative to its instantaneous center of rotation, both the slip and articulation angles increase compared to the case of symmetric loading ($\varepsilon = 0$). Conversely, when the center of mass shifts inward, these angles decrease.

Such changes in the slip and articulation angles lead to almost corresponding variations in angular velocity, lateral velocity, and lateral acceleration of the trailer's center of mass. However, regardless of the

displacement of the trailer's center of mass, at a speed of 10 m/s the articulated bus remains stable. An increase in vehicle speed results in a deterioration of motion stability, and at an eccentricity of $\varepsilon = 0.2$ the vehicle operates at the stability limit (the allowable acceleration of the center of mass should not exceed 0.45g).

Unlike transient motion modes (cornering, lane change), in steady-state conditions (straight-line motion), the presence of eccentricity leads to a decrease in critical speed regardless of the direction of displacement. In particular, in the absence of eccentricity the critical speed is $V_{\varepsilon=0}=0 = 28.12$ m/s; with outward displacement $V_{\varepsilon=0} = -0.2 = 23.95$ m/s; and with inward displacement $V_{\varepsilon=0} = 0.2 = 24.89$ m/s. These factors must be considered when loading the trailer.

Keywords: articulated bus, trailer, eccentricity, center of mass, mathematical model, stability, critical speed.

САХНО Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: svp_40@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

МАЯК Микола Михайлович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>

ХОРОШУН Роман Васильович, доктор філософії, старший викладач кафедри автотранспорту та логістики, Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, e-mail: roman_086@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>

КОТЕНКО Андрій Степанович, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>

Volodymyr SAKHNO, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, e-mail: svp_40@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

Mykola MAYAK, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>

Roman KHOROSHUN, Doctor of Philosophy, senior lecturer of the Department of Motor Transport and Logistics, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, e-mail: roman_086@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>

Andrii KOTENKO, Postgraduate student of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>

Дата надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

<https://doi.org/10.36910/0bt3nb30>

Тицький О.Ю., Токін О.П.
Національний транспортний університет

СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ВЕЛИКОВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

У статті продемонстровано достатньо широкі можливості використання віддаленої автоматизованої діагностики великовантажних автомобілів, зокрема, діагностики двигунів автомобілів Scania.

За результатами використання функцій «Забезпечення балансу циліндрів», «Перевірка балансу циліндрів» та «Перевірка компресії» програмного забезпечення Scania Diagnos 3 & Programmer отримано параметри впливу окремих циліндрів двигуна DC13 164 L01 автомобіля Scania R 450 A4x2NA на величину циклової подачі, крутного моменту та рівномірності частоти обертання.

Отримані результати вимірювань свідчать про наявну різницю в ефективності окремих циліндрів та необхідність усунення причин цих відмінностей. Так, за результатом виконання функції «Перевірка балансу циліндрів» оцінено ефективність робочих ходів в окремих циліндрах та встановлено збільшення крутного моменту на 5 Нм порівняно з базовим у циліндрах 1, 5; на 1 Нм – у циліндрі 3; зниження на 7 Нм та 4 Нм – у циліндрах 6 та 2, що свідчить про значне погіршення ефективності циліндрів 6 та 2. При цьому, у циліндрі 6 погіршення викликано очевидно порушенням роботи елементів паливної системи, а у циліндрі 2 – це наслідок зменшення циклової подачі для забезпечення рівномірності ходу, що, в свою чергу призводить до збіднення суміші, зниження індикаторної роботи та, відповідно, крутного моменту.

Аналіз фактичних причин впливу роботи циліндрів на досліджені вище показники можливо зробити на основі поглибленої фізичної діагностики окремих вузлів або на основі реконструкції робочого процесу в окремих циліндрах за допомогою математичної моделі двигуна.

Ключові слова: система діагностики, вантажний автомобіль, двигун внутрішнього згоряння, ефективність роботи двигуна, циклова подача палива, крутний момент, рівномірність ходу двигуна, компресія.

ВСТУП

Автомобільний транспорт сьогодні забезпечує знаний обсяг перевезень, зокрема, вантажних. Технічний стан автомобілів значною мірою впливає на показники ефективності його експлуатації. Найважливішими показниками ефективності експлуатації вантажних автомобілів, зокрема, є показники тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності, екологічності. Названі показники забезпечуються, насамперед, технічним станом двигунів автомобілів, серед яких найбільш поширеними і основними залишаються двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Тому, ефективність експлуатації вантажних автомобілів значно залежить від ефективності процесів діагностування технічного стану їхніх двигунів внутрішнього згоряння.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розроблення ефективних систем діагностування технічного стану автомобілів та їхніх двигунів є предметом досліджень багатьох українських та закордонних авторів. Зокрема, новітні методи діагностики ДВЗ з використанням цифрових двійників представлено в роботі [1], визначення вимог до сучасних способів та засобів визначення загального технічного стану бензинових та дизельних двигунів військових електростанцій та силових установок зразків озброєння та військової техніки здійснено у роботі [2], використання можливостей інтелектуальних систем для вирішення завдань технічної експлуатації транспорту та моніторингу технічного стану їхніх двигунів представлено в роботах [3, 4, 5], аналіз моделей діагностики для визначення технічного стану транспортних засобів виконано в роботі [6], метод обробки даних, який суттєво зменшує обсяг даних та оптимізує затримку передачі між системами дистанційної діагностики та серверами баз даних, розроблено в роботі [7], систематизація систем моніторингу автомобілів за видами апаратних засобів, використовуваних для отримання інформації про транспортний засіб та інфраструктурне середовище на різних етапах виконання властивих їм функцій в умовах експлуатації, проведена в статті [8].

Аналіз результатів цих та інших досліджень у сфері діагностики технічного стану автомобільних двигунів свідчить про значний інтерес дослідників до даного питання та постійний розвиток систем діагностування. Однак, у випадку використання конкретних двигунів внутрішнього згоряння виникає потреба у розробці відповідних методик, математичних моделей та програмного забезпечення, адаптованих до конкретних завдань. З цією метою необхідний аналіз функцій та особливостей використання наявного технічного забезпечення сервісних підприємств вантажних автомобілів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження функціональних можливостей апаратного і програмного забезпечення підприємств технічного сервісу великовантажних автомобілів для віддаленої діагностики автомобільних двигунів.

Задачі дослідження:

- Аналіз сучасного рівня та можливостей автоматизації процесів технічної експлуатації автомобілів;
- Визначення основних технічних характеристик об'єкта діагностування – двигуна вантажного автомобіля;
- Аналіз функцій діагностування двигунів за допомогою програмного забезпечення Scania Diagnos 3 & Programmer;
- Аналіз отриманих результатів діагностування двигуна DC13 164 L01 автомобіля Scania R 450 A4x2NA.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Діагностика технічного стану двигунів внутрішнього згоряння є складовою загального процесу технічної експлуатації автомобілів. Сучасний підхід до діагностики технічного стану автомобілів передбачає застосування принципів інтелектуальних систем, зокрема, транспортних [3]. Програмне забезпечення транспортних інтелектуальних систем забезпечує зв'язок між інформаційними базами даних про параметри експлуатації автомобіля, веб-сервером обробки запитів-відповідей, інтелектуальними комплексами обробки даних про параметри експлуатації автомобілів та бортовими комплексами збору даних про роботу агрегатів автомобілів з використанням засобів інтернет-мережі. Приклад загальної структури обміну даними між вказаними елементами системи представлено на рис. 1.

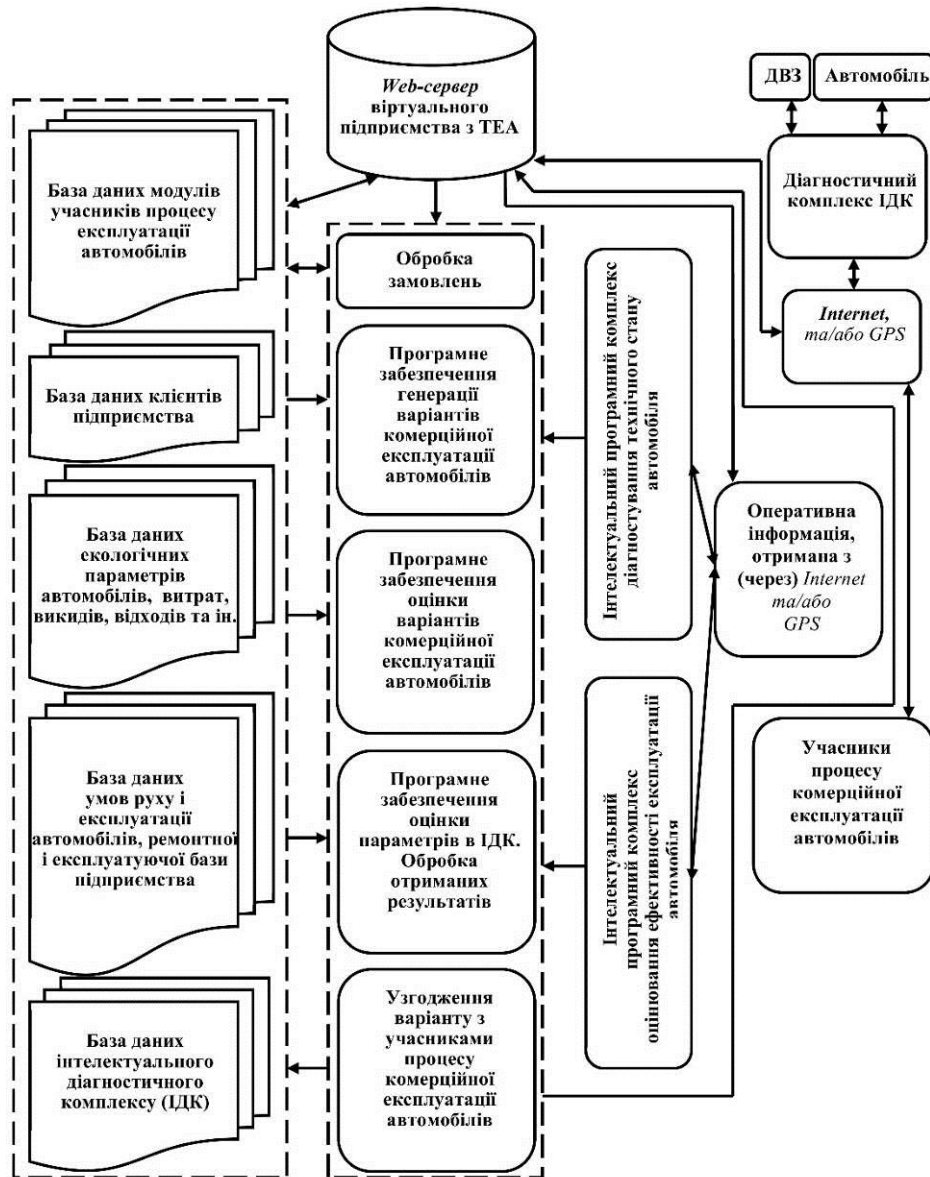


Рисунок 1 – Загальна структура обміну даними між елементами інтелектуальної системи під час технічної експлуатації автомобілів [3]

У якості прикладу застосування представленого підходу до технічної діагностики розглянемо систему діагностики двигунів автомобілів Scania. Об'єкт діагностування – сідельний тягач Scania R 450 A4x2NA з двигуном DC13 164 L01 (рис. 2). Основні технічні характеристики автомобіля наведено в таблиці 1.



а



б

Рисунок 2 – Об’єкт діагностування – сідельний тягач Scania R 450 A4x2NA (а) з двигуном DC13 164 L01 (б)

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики автомобіля Scania R 450 A4x2NA

Назва параметру	Значення параметру
VIN-код	YS2R4X20005614812
Тип автомобіля	Сідельний тягач
Колісна формула	4x2
Колісна база, мм	3750
Ширина шасі,	2550
Навантаження на передню вісь, кг	7500
Навантаження на задню вісь, кг	11500
Повна маса, кг	19000
Повна маса автопоїзда, кг	45000
Двигун	DC13 164 L01
Тип	рядний, 4-тактний
Вид палива	Дизельне
Число циліндрів	6
Порядок роботи циліндрів	1-5-3-6-2-4
Літраж, л	12,7
Максимальна потужність, кВт	331
Максимальний крутний момент, Нм	2350
Паливна система	Common Rail EMD1
Система очистки відпрацьованих газів	нейтралізатор SCR DNXR805EX з електричним підігрівом, окислювальний нейтралізатор DW1006SW, сажовий фільтр DPF DW2167SW
Екологічний клас	Euro 6
Зчеплення	Автоматичне фрикційне K432 62
Коробка передач	GRS895R з демультіплікатором та дільником
Ретардер	Scania TMS R3500

Основне програмне забезпечення, яке використовується для процесу діагностування – Scania Diagnos 3 & Programmer (рис. 3а), яке підключається до автомобіля за допомогою інтерфейсу VCI3 (рис. 3б).



а



б

Рисунок 3 – Програмне забезпечення Scania Diagnos 3 & Programmer (а) та інтерфейс VCI3 (б)

За допомогою вказаного діагностичного та інтерфейсного обладнання здійснюється віддалена діагностика усіх основних систем автомобіля та моніторинг стану систем відповідно вимог безпеки перевезень.

У якості прикладу розглянемо процес діагностування технічного стану двигуна. Вікно доступу до основних операцій діагностування двигуна (рис. 4) дозволяє вибрати потрібну систему та діагностичну функцію.

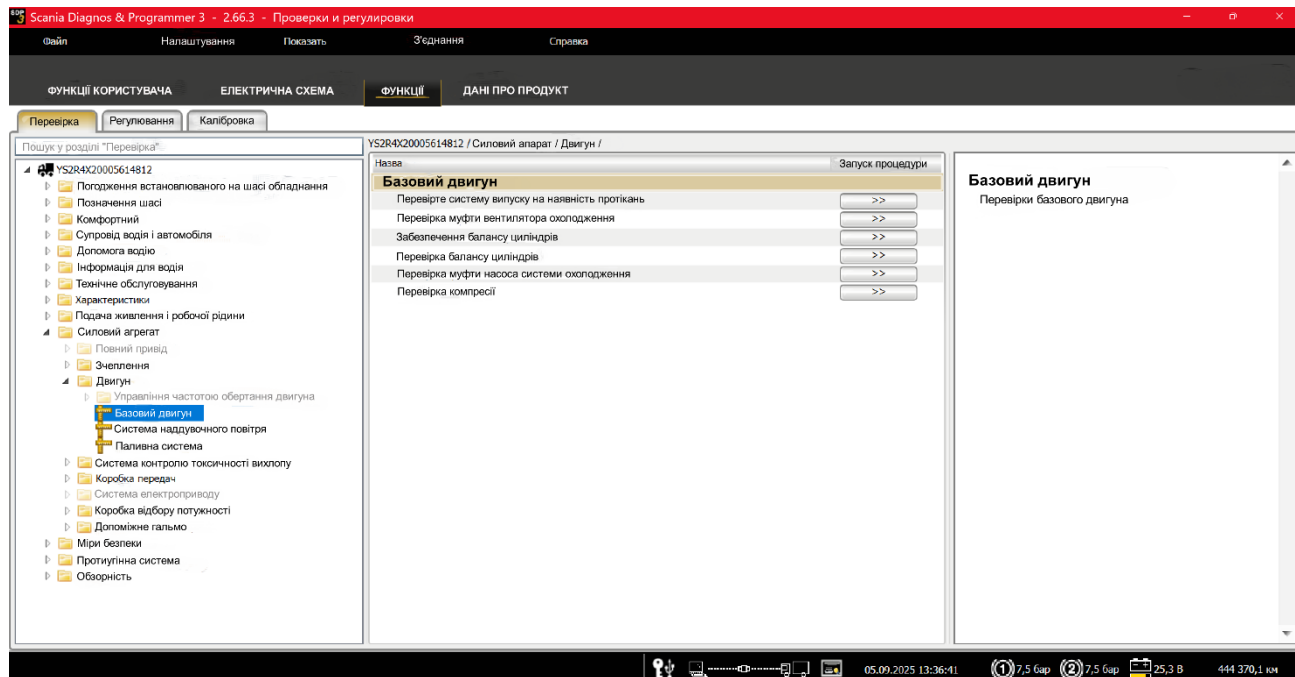


Рисунок 4 – Вікно доступу до основних операцій діагностування двигуна

Основну комплексну інформацію про технічний стан паливної системи та механізмів двигуна можна отримати на основі функцій «Забезпечення балансу циліндрів», «Перевірка балансу циліндрів» та «Перевірка компресії».

Програмне забезпечення містить основні вимоги до виконання кожної діагностичної функції та виконує весь процес в автоматизованому режимі (оператор вибирає функцію, діагностична система виконує усі подальші операції без участі оператора).

На рис. 5 показано результат виконання функції «Забезпечення балансу циліндрів».

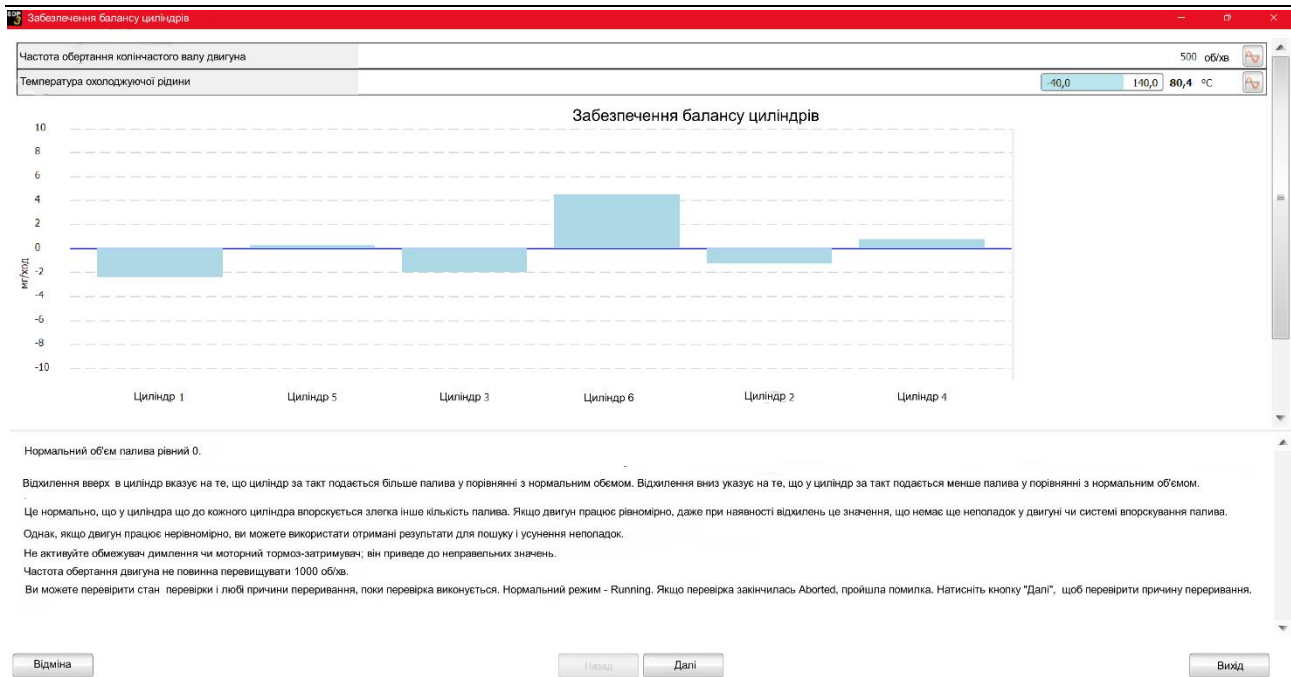


Рисунок 5 – Результат виконання функції «Забезпечення балансу циліндрів»

Дана функція показує наскільки відрізняється циклова подача палива по циліндрам двигуна для забезпечення необхідної рівномірності ходу.

Результат виконання функції «Перевірка балансу циліндрів» представлено на рис. 6

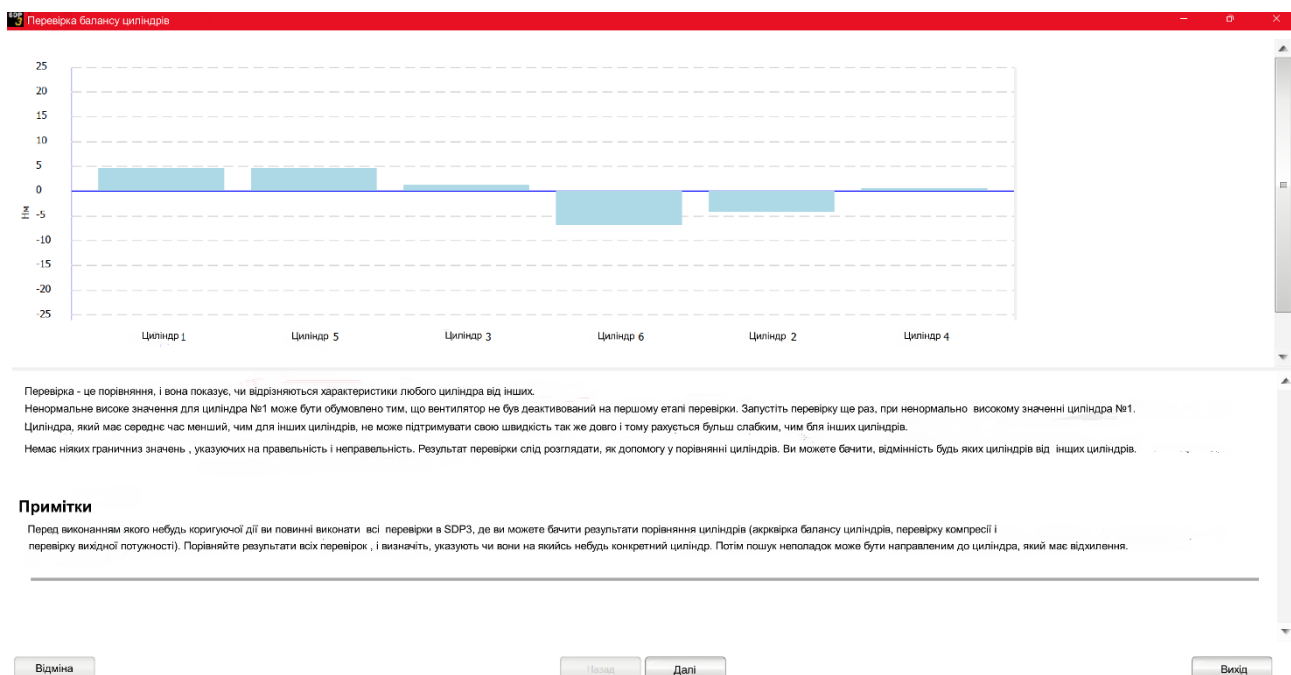


Рисунок 6 – Результат виконання функції «Перевірка балансу циліндрів»

Дана функція дозволяє оцінити на скільки відрізняється внесок у створення крутного моменту кожним циліндром за даної рівномірності ходу двигуна.

В результаті застосування функції «Перевірка компресії» отримано наступний результат (рис. 7).



Рисунок 7 – Результат виконання функції «Перевірка компресії»

Ця функція показує відхилення від рівномірності ходу від впливу кожного циліндра.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати свідчать про достатньо широкі можливості використання віддаленої автоматизованої діагностики великовантажних автомобілів, зокрема, діагностики двигунів автомобілів Scania.

Так, за результатами застосування функції «Забезпечення балансу циліндрів» отримано наступні результати. У циліндрах 1, 3, 2 спостерігається зниження циклової подачі палива на 1-2 мг порівняно з базовою подачею; у циліндрі 6 циклова подача збільшена на 4,5 мг; у циліндрі 4 – збільшена на 1 мг; у циліндрі 5 – майже не відрізняється від базової. Такі результати свідчать про вищу ефективність роботи циліндрів 1, 3, 2 порівняно з іншими циліндрами. Циліндр 5 має середню ефективність. Циліндри 4 та 6 мають знижену ефективність. Електронна система управління подачею палива намагається забезпечити рівномірний хід двигуна через управління подачею палива по циліндрам. Однак, отриманий результат може бути наслідком нерівномірності параметрів паливного насоса та форсунок при роботі окремих циліндрів.

Тому, для оцінювання ефективності саме робочого ходу в циліндрах служить функція «Перевірка балансу циліндрів». За результатом цієї функції встановлено збільшення крутного моменту на 5 Нм порівняно з базовим у циліндрах 1, 5; на 1 Нм – у циліндрі 3; зниження на 7 Нм та 4 Нм – у циліндрах 6 та 2; у циліндрі 4 майже не відрізняється від базового. Це свідчить про значне погіршення ефективності циліндрів 6 та 2. При цьому, у циліндрі 6 погіршення викликано очевидно порушенням роботи елементів паливної системи, а у циліндрі 2 – це наслідок зменшення циклової подачі для забезпечення рівномірності ходу.

Додаткову інформацію дає результат функції «Перевірка компресії» який характеризує вплив різниці в компресії окремих циліндрів на миттєву частоту обертання колінчастого валу. З результатів видно, що компресія у циліндрах 1, 6 майже однакова, у циліндрі 5 – дещо погіршена, у циліндрах 3, 2, 4 – трохи вища середньої. Це може пояснювати погіршену ефективність циліндра 2 за впливом на крутний момент внаслідок збіднення суміші (більша компресія є наслідком більшого наповнення циліндра повітрям, а зменшення циклової подачі палива викликає збіднення паливоповітряної суміші, що знижує індикаторну роботу та відповідно крутний момент).

Аналіз фактичних причин впливу роботи циліндрів на досліджені вище показники можливо зробити на основі поглибленої фізичної діагностики окремих вузлів або на основі реконструкції робочого процесу в окремих циліндрах за допомогою математичної моделі двигуна.

ВИСНОВКИ

У статті продемонстровано достатньо широкі можливості використання віддаленої автоматизованої діагностики великовантажних автомобілів, зокрема, діагностики двигунів автомобілів Scania.

За результатами використання функцій «Забезпечення балансу циліндрів», «Перевірка балансу циліндрів» та «Перевірка компресії» програмного забезпечення Scania Diagnos 3 & Programmer отримано параметри впливу окремих циліндрів двигуна DC13 164 L01 автомобіля Scania R 450 A4x2NA на величину циклової подачі, крутного моменту та рівномірності частоти обертання.

Отримані результати вимірювань свідчать про наявну різницю в ефективності окремих циліндрів та необхідність усунення причин цих відмінностей. Аналіз фактичних причин впливу роботи циліндрів на досліджені вище показники можливо зробити на основі поглибленої фізичної діагностики окремих вузлів або на основі реконструкції робочого процесу в окремих циліндрах за допомогою математичної моделі двигуна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мінчев Д.С. Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників: дис. ... д-р техн. наук : 05.05.03. Одеса, 2023. 408 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/bec103f8-ac92-4500-ac18-2198162ac3ed/content>
2. Кононов В.Б., Кононова О.А., Мусаїрова Ю.Д. Обґрунтування вимог до сучасних способів та засобів визначення загального технічного стану бензинових та дизельних двигунів військових електростанцій та силових установок зразків озброєння та військової техніки. Системи Управління, Навігації Та Зв'язку. Збірник Наукових Праць, 2020. № 2(60), С. 21–26. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2020.2.021>.
3. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б., Грицук І.В., Смешек М., Волкова Т.В., Цюман М.П. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія. Харків: Вид-во ІТМТ, 2015. 336 с.
4. Дмитриченко М.Ф., Матейчик В.П., Волков В.П., Грицук О.К., Цюман М.П., Грицук І.В., Вайгант Г.О., Клименко О.А. Програмне забезпечення систем моніторингу транспорту: монографія. К.: НТУ, 2016. 204 с. URL: http://lib.ntu.edu.ua/catalog/docs/VRM/VRM%2098_2016.pdf.
5. Dobrovolskyi, O., & Navrotskyi, A. (2025). Analysis and synthesis of functional capabilities of monitoring systems of vehicle operation processes. The National Transport University Bulletin, 29(2), 18-29. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2025-2-29-18-29>.
6. Бурлака, С., Митко, М., Борисюк, Д. (2024). Аналіз моделей діагностики для визначення технічного стану транспортних засобів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. № 343(6(1)). С. 39-42. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5>.
7. Görne, L., Reuss, H.-C., Krätschmer, A., & Sauerwald, R. (2022). Smart data preprocessing method for remote vehicle diagnostics to increase data compression efficiency. Automotive and Engine Technology, 7, 307-316. <https://doi.org/10.1007/s41104-022-00113-9>.
8. Матейчик, В., Навроцький, А. (2024). Систематизація схем апаратного забезпечення систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, № (48), С. 184–192. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310711>.

REFERENCES

1. Minchev, D.S. (2023). Metody diahnostyky tekhnichnoho stanu dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia z vykorystanniam tsyfrovyykh dviinykiv [Diagnostic Methods for Internal Combustion Engines Technical Condition Assessment using Digital Twins]. Doctor's thesis. Odessa: Odessa National Maritime University [in Ukrainian].
2. Kononov, V., Kononova, O., & Musairova, Yu. (2020). Obhruntuvannia vymoh do suchasnykh sposobiv ta zasobiv vyznachennia zahalnoho tekhnichnoho stanu benzynovykh ta dyzelnykh dvyhuniv viiskovykh elektrostansii ta sylovykh ustanovok zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Substantiation of requirements for modern methods and means of determining the general technical condition of gasoline and diesel engines of military power plants and power installations of weapons and military equipment]. Systemy Upravlinnia, Navihatsii Ta Zviazku. Zbirnyk Naukovykh Prats – Control, Navigation, and Communication Systems. Collection of Scientific Papers, 2(60), 21–26. <https://doi.org/10.26906/sunz.2020.2.021> [in Ukrainian].
3. Volkov V.P., Mateichyk V.P., Komov P.B., Hrytsuk I.V., Smeshek M., Volkova T.V., Tsiuman M.P. (2015). Intelktualni systemy monitorynhu transportu: monohrafiia [Intelligent transport monitoring systems: monograph]. Kharkiv, Ukraine: ITMT. [in Ukrainian].
4. Dmytrychenko M.F., Mateichyk V.P., Volkov V.P., Hryshchuk O.K., Tsiuman M.P., Hrytsuk I.V., Vaihanh H.O., Klymenko O.A. Prohramne zabezpechennia system monitorynhu transportu: monohrafiia

[Software for transport monitoring systems: monograph]. Kyiv, Ukraine: NTU. http://lib.ntu.edu.ua/catalog/docs/VRM/VRM%2098_2016.pdf [in Ukrainian].

5. Dobrovolskyi, O., & Navrotskyi, A. (2025). Analysis and synthesis of functional capabilities of monitoring systems of vehicle operation processes. The National Transport University Bulletin, 29(2), 18-29. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2025-2-29-18-29> [in English].

6. Burlaka, Serhii, Mytko, Mykola, & Borysiuk, Dmytro. (2024). Analiz modelei diahnozyky dlia vyznachennia tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv [Analysis of diagnostic models for determining technical condition vehicles]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 343(6(1)), 39–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5> [in Ukrainian].

7. Görne, L., Reuss, H.-C., Krätschmer, A., & Sauerwald, R. (2022). Smart data preprocessing method for remote vehicle diagnostics to increase data compression efficiency. Automotive and Engine Technology, 7, 307-316. <https://doi.org/10.1007/s41104-022-00113-9> [in English].

8. Mateichyk, V. P., & Navrotskyi, A. V. (2024). Systematyzatsiia skhem aparatnoho zabezpechennia system monitorynhu ekspluatatsii transportnykh zasobiv [Systematization of hardware schemes of vehicle operation monitoring systems]. Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni Nauky – Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences, (48), 184–192. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310711> [in Ukrainian].

Tytskyi O.Yu., Tokin O.P. System for diagnosing the technical condition of internal combustion engines of heavy duty vehicles.

The article demonstrates the wide possibilities of using remote automated diagnostics of heavy trucks, in particular, diagnostics of Scania engines.

Based on the results of using the functions "Ensuring cylinder balance", "Cylinder balance check" and "Compression check" of the Scania Diagnos 3 & Programmer software, the parameters of the influence of individual cylinders of the DC13 164 L01 engine of the Scania R 450 A4x2NA vehicle on the value of cyclic fuel feed, torque and uniformity of rotation frequency were obtained.

The obtained measurement results indicate the existing difference in the efficiency of individual cylinders and the need to eliminate the causes of these differences. Thus, based on the results of the "Cylinder balance check" function, the efficiency of the working strokes in individual cylinders was assessed and an increase in torque of 5 Nm compared to the base torque in cylinders 1, 5 was established; by 1 Nm in cylinder 3; a decrease of 7 Nm and 4 Nm in cylinders 6 and 2, respectively, indicating a significant deterioration in the efficiency of cylinders 6 and 2. At the same time, in cylinder 6, the deterioration was obviously caused by a malfunction of the fuel system elements, and in cylinder 2, it was a consequence of a decrease in the cyclic supply to ensure uniformity of the stroke, which, in turn, leads to a leaner mixture, a decrease in indicator work and, accordingly, torque.

The analysis of the actual causes of the influence of cylinder operation on the above-studied indicators can be done on the basis of in-depth physical diagnostics of individual nodes or on the basis of reconstruction of the working process in individual cylinders using a mathematical model of the engine.

Keywords: diagnostic system, truck, internal combustion engine, engine efficiency, cyclic fuel feed, torque, engine frequency uniformity, compression.

ТИЦЬКИЙ Олександр Юрійович, аспірант кафедри виробництва, ремонту і матеріалознавства, Національний транспортний університет, e-mail: alexandert1976@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3148-2746>.

ТОКІН Олександр Павлович, професор кафедри виробництва, ремонту і матеріалознавства, Національний транспортний університет, e-mail: a2atp@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7353-4228>.

Oleksandr TYTSKYI, Postgraduate Student, Department of Manufacturing, Repairing and Materials Science, National Transport University, e-mail: alexandert1976@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3148-2746>.

Oleksandr TOKIN, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Manufacturing, Repairing and Materials Science, National Transport University, e-mail: a2atp@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7353-4228>.

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

<https://doi.org/10.36910/tnex5v29>

Фисун В.В.

*Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, Україна***ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВВЕДЕННЯ В ШТАТ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН
НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЛЕГКОВИХ ПРИЧЕПІВ ПІД
ЧАС ВИКОНАННЯ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ МОБІЛЬНИМИ ВОГНЕВИМИ ГРУПАМИ**

Ворог постійно застосовує ударні БПЛА з метою нанесення повітряних ударів по містах України. Кожну ніч, кожна доба з метою ефективного виконання завдань з прикриття повітряного простору об'єктів критичної інфраструктури та інших державних і стратегічних військових об'єктів, які потенційно можуть опинитися під ударом БПЛА типу «Шахід» здійснюється бойове чергування особовим складом Національної Гвардії України у складі мобільних вогневих груп. Створення мобільних вогневих груп є вимушеним кроком. Вони потрібні для того, щоб закрити небо над Україною, щоб локально захистити об'єкти інфраструктури та інші державні й стратегічні військові об'єкти, які потенційно можуть опинитися під ударом ворога.

Використання легкових причепів легковими автомобілями різних груп експлуатації для виконання бойових завдань мобільними вогневими групами є важливим кроком до підвищення ефективності боротьби з повітряними загрозами та збільшення кількості вогневих позицій для прикриття неба під час оголошення повітряних тривог. Такий підхід дозволяє створювати додаткові мобільні пункти для розміщення бойових засобів, які можуть оперативно змінювати місце розташування, що є важливою перевагою в умовах динамічної бойової ситуації.

Оснащення легкових причепів турелями з озброєнням та іншими бойовими модулями дозволить сформувати повноцінну вогневу позицію мобільної вогневої групи, здатної ефективно виконувати завдання з вогневої підтримки, а також протидіяти ворожим повітряним цілям. Такі причепа можна буде використовувати не лише з легковими автомобілями, але й з іншими транспортними засобами, зокрема, багі, квадроцикли та інші спеціалізовані транспортні засоби підрозділів. Це розширює можливості мобільності та застосування вогневих засобів в будь-яких умовах, зокрема на складному ландшафті або обмежених зонах.

Крім того, важливим фактором є економічна вигода від використання легкових причепів у порівнянні з іншими варіантами, такими як пікапи чи інші спеціалізовані транспортні засоби. Вартість легкового причепа є значно нижчою, у кілька десятків разів, що робить їх більш доступними для оснащення великих кількостей підрозділів. За таких умов легкові причепа стануть оптимальним варіантом для забезпечення мобільності та бойових можливостей підрозділів при мінімальних фінансових витратах. Цей підхід дозволяє не тільки економити бюджет, але й збільшувати кількість мобільних вогневих груп, що в свою чергу підвищує загальну боездатність та ефективність сил, залучених до виконання завдань із протиповітряної оборони.

Ключові слова: закрити небо над Україною, мобільні вогневі групи, збереження життя та здоров'я населення, захистити об'єкти держави, легкові причепа.

ВСТУП

Сучасні умови забезпечення обороноздатності держави та ведення бойових дій висувають підвищені вимоги до системи логістичного забезпечення Збройних Сил України, складовою якої є організація та здійснення військових перевезень. Ефективність військових автомобільних перевезень безпосередньо впливає на своєчасність підвезення матеріально-технічних засобів, підтримання боездатності підрозділів, можливість маневру силами і засобами, а також на стійкість військових формувань у цілому. В умовах воєнного стану, дефіциту штатної військової автомобільної техніки та зростаючих ризиків ураження транспортних комунікацій особливого значення набуває залучення альтернативних транспортних ресурсів, зокрема цивільних легкових автомобілів з причепами.

Практика сучасних бойових дій в Україні засвідчує, що легкові автомобілі з причепами широко використовуються для вирішення завдань підвезення дрібнопартійних вантажів, доставки матеріальних засобів безпосередньо до підрозділів тактичної ланки, евакуації майна та обладнання, у межах волонтерської логістики і військово-транспортного обов'язку, а також можливістю встановлення обладнання різного типу та призначення. Такі транспортні засоби характеризуються високою доступністю, мобільністю та можливістю швидкого залучення, переобладнання, що робить їх важливим елементом логістичного забезпечення у складних і динамічних умовах бойової обстановки. Водночас використання легкових автомобілів з причепами супроводжується низкою обмежень і ризиків, пов'язаних з їх технічними характеристиками, безпекою дорожнього руху, бойовою вразливістю та відсутністю чітко визначених методичних підходів до оцінки ефективності такого виду перевезень.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Організація та здійснення військових автомобільних перевезень в Україні регламентуються сукупністю законодавчих, доктринальних, нормативно-правових і керівних документів, які визначають правові підстави залучення транспортних засобів, порядок планування і управління перевезеннями, вимоги до безпеки руху та експлуатації автомобільної техніки. Умови воєнного стану та особливого періоду обумовлюють необхідність узгодженого застосування норм військового та цивільного законодавства, а також адаптації загальних правил дорожнього руху до специфіки бойових дій [1; 3; 4].

Базові правові основи організації військових перевезень закладені у законах України, що регулюють сферу оборони, мобілізаційної підготовки та транспорту. Закон України «Про оборону України» визначає загальні засади підготовки держави до оборони, зокрема питання забезпечення Збройних Сил України матеріально-технічними ресурсами та транспортом у мирний час і в особливий період [7]. У цьому контексті автомобільні перевезення розглядаються як невід’ємна складова системи забезпечення обороноздатності держави.

Основним для тематики залучення легкових автомобілів з причепами є Закон України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію», який визначає правові механізми залучення транспортних засобів підприємств, установ, організацій та громадян у межах військово-транспортного обов’язку [2]. Норми цього закону створюють правові підстави для використання цивільних автомобілів, у тому числі легкових, для виконання завдань військових перевезень, що набуває особливої актуальності в умовах дефіциту штатної військового автомобільного транспорту.

Закон України «Про автомобільний транспорт» встановлює загальні вимоги до організації перевезень, експлуатації транспортних засобів, відповідальності перевізників та водіїв [5]. Хоча він має цивільний характер, його положення застосовуються і до військових перевезень у частині, що не суперечить спеціальним нормам військового законодавства. Це стосується, зокрема, вимог до технічного стану транспортних засобів, кваліфікації водіїв та безпеки перевезення вантажів.

Керівні документи та доктринальні положення у сфері логістики, тобто доктринальні документи Збройних Сил України відіграють системоутворюючу роль у визначенні підходів до організації військових перевезень. Доктрина «Об’єднана логістика» закріплює принципи інтегрованого логістичного забезпечення, у межах якого перевезення розглядаються як функція переміщення і транспортування, що забезпечує безперервність постачання та маневр сил і засобів [1]. У документі підкреслюється необхідність гнучкого використання наявних транспортних ресурсів, включно із залученими, залежно від оперативної обстановки.

Бойові статuti та керівництва Збройних Сил України конкретизують порядок планування і здійснення транспортних операцій на різних рівнях управління. Зокрема, у бойових статутах Сухопутних військ визначаються завдання транспортних підрозділів, порядок організації колонного руху, вимоги до охорони і маскування маршрутів, а також особливості перевезень у зоні бойових дій [3]. Ці положення є методичною основою для прийняття рішень командирами щодо використання того чи іншого виду автомобільного транспорту, у тому числі легкових автомобілів з причепами.

У контексті євроатлантичної інтеграції важливим орієнтиром є доктрини і керівні документи НАТО, зокрема Allied Joint Movement and Transportation Doctrine (AJP-4.4), які визначають підходи до планування руху і транспортування у спільних операціях [4]. Хоча ці документи не є обов’язковими до прямого застосування, їх положення використовуються як методологічна база для вдосконалення національної системи військових перевезень і підвищення сумісності.

Технічні аспекти експлуатації автомобільних доріг і транспортних засобів регламентуються державними стандартами, зокрема ДСТУ у сфері безпеки дорожнього руху, які встановлюють вимоги до стану доріг, мостів і переправ [10]. Для військових перевезень ці норми мають важливе значення при оцінці прохідності маршрутів та допустимого навантаження на дорожню інфраструктуру, особливо при русі автомобілів з причепами.

Специфічним елементом нормативно-правової бази військових перевезень є акти, що регулюють військово-транспортний обов’язок. Положення про військово-транспортний обов’язок та порядок ведення військового обліку транспортних засобів встановлюють механізми обліку, залучення, використання і повернення транспортних засобів у період мобілізації та воєнного стану [8; 9]. Ці документи безпосередньо стосуються практики використання легкових автомобілів з причепами, оскільки саме цей сегмент транспорту є чисельним і відносно швидко залучається до виконання завдань перевезень.

Разом із тим аналіз чинних нормативних актів свідчить, що вони переважно орієнтовані на загальні питання обліку та залучення транспорту і недостатньо деталізують особливості його

експлуатації в бойових умовах. Зокрема, відсутні чіткі рекомендації щодо допустимих режимів використання легкових автомобілів з причепами, критеріїв відбору таких транспортних засобів для виконання конкретних завдань, а також методик оцінки їх ефективності і безпеки у військових перевезеннях.

Проведений аналіз керівних документів та нормативно-правової бази дозволяє зробити висновок, що правові та методичні засади військових автомобільних перевезень в Україні сформовані на достатньо широкій ієрархічній основі — від законів і доктрин до бойових статутів, стандартів і підзаконних актів. Водночас значна частина цих документів має загальний характер і не враховує у повному обсязі специфіку використання легкових автомобілів з причепами у військових перевезеннях.

Ця обставина обумовлює необхідність подальшого аналізу практики застосування таких транспортних засобів та розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо їх використання з урахуванням чинної нормативної бази, вимог безпеки та реальних умов виконання завдань.

Аналіз бойового застосування штатних і позаштатних вогневих і мобільних вогневих груп. На сьогоднішній день у Національній гвардії України створені штатні підрозділи прикриття повітряного простору, основним завданням яких є протидія повітряним загрозам та захист важливих державних, військових і критичних об'єктів. Зазначені підрозділи забезпечуються озброєнням та військовою технікою. Така комплектація дозволяє організовувати як стаціонарні, так і мобільні вогневі позиції, забезпечуючи цілодобове чергування та оперативне реагування на повітряні загрози.

Разом з тим, з метою подальшого збільшення щільності «повітряного щита», підвищення мобільності підрозділів і досягнення більшої ефективності у знищенні повітряних цілей, у військових частинах Національної гвардії України додатково формуються позаштатні вогневі та мобільні вогневі групи. Такі групи створюються з урахуванням реальної оперативної обстановки та постійної інтенсивності повітряних атак, які Україна переживає щодня і щоночі. Позаштатні вогневі групи забезпечуються та використовують широкий спектр озброєння та військової техніки.

Особливістю таких позаштатних формувань є гнучкий підхід до вибору транспортних засобів, що безпосередньо залежить від характеру загрози, умов місцевості та поставлених завдань. Окрім вантажних автомобілів і пікапів, у складі вогневих і мобільних вогневих груп застосовуються транспортні засоби різних типів і класів, зокрема багі, квадроцикли, патрульні автомобілі, джипи, мікроавтобуси та інші наявні платформи. Такий різноманітний парк техніки дозволяє підрозділам швидко маневрувати, займати вигідні вогневі позиції, діяти у важкодоступній місцевості та оперативно змінювати райони чергування.

Слід також зауважити, що способи застосування вогневих і мобільних вогневих груп суттєво відрізняються залежно від тактики дій противника, особливостей рельєфу, забудови та погодних умов. У різних ситуаціях групи можуть діяти як у складі організованих колон, так і розосереджено, виконуючи завдання з прикриття визначених секторів повітряного простору або важливих об'єктів. Така адаптивність, поєднана з наявністю різноманітного озброєння і транспортних засобів, значно підвищує загальну ефективність системи протиповітряного прикриття, яку забезпечує Національна гвардія України.

Постановка проблеми. Силами оборони України на сьогодні застосовується недостатня кількість вогневих та мобільних вогневих груп для ефективної протидії масованому застосуванню ударних безпілотних літальних апаратів типу «Шахід», які держава-агресор РФ використовує у великій кількості, з різними часовими інтервалами та з різних напрямків. Така тактика противника спрямована на перевантаження наявної системи протиповітряної оборони, ускладнення своєчасного виявлення цілей та зниження ефективності їх ураження.

Обмежена кількість вогневих і мобільних вогневих груп призводить до зменшення щільності вогню на окремих ділянках, що, у свою чергу, створює «вікна» в системі прикриття повітряного простору. Це дозволяє частині ворожих БПЛА прориватися до об'єктів критичної інфраструктури і населених пунктів, завдаючи матеріальних збитків та створюючи загрозу життю населення.

Крім того, одночасні або послідовні пуски ударних БПЛА з різних напрямків змушують наявні вогневі групи працювати на межі можливостей, здійснювати часті переміщення та швидко змінювати позиції, що ускладнює організацію безперервного чергування та своєчасного реагування. У таких умовах зростає потреба у збільшенні кількості вогневих груп, їх більш раціональному розосередженні, а також у посиленні матеріально-технічного забезпечення та координації дій між підрозділами.

Таким чином, наявна ситуація вимагає комплексного підходу до нарощування спроможностей вогневих і мобільних вогневих груп, удосконалення тактики їх застосування та підвищення рівня взаємодії з іншими елементами системи протиповітряної оборони. Це дозволить підвищити ефективність протидії масованим атакам ударних БПЛА противника та забезпечити більш надійний захист повітряного простору України.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

З урахуванням сучасних умов ведення бойових дій та зростаючої інтенсивності повітряних загроз існує об'єктивна необхідність введення до штатів військових частин Національної гвардії України легкових причепів у кількості, що відповідає наявному парку легкових автомобілів. Такий підхід дозволить значно розширити функціональні можливості підрозділів без суттєвого збільшення кількості спеціалізованої техніки та фінансових витрат.

Використання легкових причепів під час виконання бойових завдань мобільними вогневими групами створює додаткові можливості для розміщення озброєння та додаткового обладнання. Оснащені відповідним обладнанням причепа можуть використовуватися як повноцінні мобільні вогневі позиції або як допоміжні платформи, що підвищують автономність і тривалість роботи вогневих груп на визначених напрямках.

Крім того, введення легкових причепів у штат дозволить більш ефективно задіювати легкові автомобілі, які вже перебувають на забезпеченні військових частин, а також різні типи транспортних засобів підрозділів. Це сприятиме підвищенню мобільності, швидкому маневруванню та оперативній зміні вогневих позицій без необхідності залучення дорогих спеціалізованих платформ. У контексті забезпечення безпеки повітряного простору та протидії повітряним цілям, зокрема безпілотним літальним апаратам, такий підхід дозволить збільшити кількість мобільних вогневих груп, підвищити щільність прикриття та загальну ефективність системи протиповітряної оборони на тактичному рівні.

Таким чином, введення легкових причепів до штатів військових частин Національної гвардії України є доцільним та обґрунтованим рішенням, яке сприятиме підвищенню бойових спроможностей мобільних вогневих груп, оптимізації використання наявних ресурсів та посиленню захисту повітряного простору держави.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Обґрунтування продуктивності та витрат на перевезення є одним із ключових етапів оцінювання доцільності використання легкових автомобілів з причепами у військових перевезеннях. На тактичному рівні такі перевезення, як правило, здійснюються дрібними партіями вантажів з метою оперативного підвозу матеріально-технічних засобів до розосереджених підрозділів, доставки запасів у складних дорожніх умовах або евакуації майна. У зв'язку з цим основну роль відіграють не максимальні обсяги перевезень, а швидкість реагування, можливість гнучкого маневру та сумарна надійність транспортного процесу [1; 3].

Для кількісної оцінки таких перевезень у кваліфікаційній роботі застосовуються загальноприйняті підходи теорії транспортних процесів і економіки автомобільного транспорту, адаптовані до умов воєнного часу та чинних нормативних обмежень [6; 14].

Вихідні дані та прийняті припущення

Розрахунки виконуються для автопоїзда типу «легковий автомобіль + причеп» з урахуванням вимог Правил дорожнього руху України та технічних обмежень щодо буксирування причепів [6]. Усі змінні вважаються детермінованими і можуть коригуватися залежно від конкретних умов виконання перевезення.

Основні параметри розрахункової моделі:

L – довжина маршруту в одному напрямку, км

$L_{\text{заг}}$ – повний пробіг одного рейсу, км

$V_{\text{т}}$ – технічна швидкість руху автопоїзда, км/год

$t_{\text{нав}}$ – час навантаження, год

$t_{\text{р}}$ – час розвантаження, год

$t_{\text{д}}$ – допоміжний час (очікування, маневрування, контроль), год

$\Phi_{\text{зм}}$ – фонд часу роботи за зміну, год

q – маса вантажу за один рейс, т

$H_{\text{с}}$ – базова витрата пального без причепа, л/100 км

$H_{\text{пр}}$ – коефіцієнт збільшення витрати пального на кожну тонну при буксируванні причепа

$G_{\text{пр}}$ – загальна маса причепа з вантажем, т

Розрахунок часу транспортного циклу

Час одного транспортного циклу включає час руху автопоїзда та тривалість навантажувально-розвантажувальних операцій. Він визначається за формулою:

$$T_c = t_{\text{рух}} + t_{\text{нав}} + t_p + t_d \quad (1)$$

де T_c – тривалість транспортного циклу, год;

$t_{\text{рух}}$ – час руху автопоїзда, год.

Час руху при маятниковій схемі перевезення визначається так:

$$t_{\text{рух}} = \frac{L_{\text{заг}}}{V_T} \quad (2)$$

При цьому повний пробіг рейсу дорівнює:

$$L_{\text{заг}} = 2L \quad (3)$$

Зниження технічної швидкості автопоїзда порівняно з одиночним автомобілем пояснюється обмеженнями швидкості, збільшенням гальмівного шляху та необхідністю дотримання підвищених інтервалів безпеки під час руху з причепом [6].

Розрахунок кількості рейсів і продуктивності перевезень

Кількість рейсів, які може виконати автопоїзд за одну зміну, визначається відношенням фонду робочого часу до тривалості транспортного циклу:

$$n = \frac{\Phi_{\text{зм}}}{T_c} \quad (4)$$

Фактично приймається ціла частина значення n , оскільки незавершений рейс не враховується.

Обсяг перевезень за зміну визначається за формулою:

$$Q = nq \quad (5)$$

Вантажообіг при перевезенні вантажу лише в одному напрямку становить:

$$W = nqL \quad (6)$$

Незважаючи на меншу вантажопідйомність порівняно з вантажними автомобілями, легкові автомобілі з причепами можуть забезпечувати необхідний обсяг підвозу за рахунок більшої кількості рейсів та скорочення часу підготовки перевезень [1; 13].

Розрахунок витрат пального

Буксирування причепа призводить до зростання витрати пального внаслідок збільшення маси автопоїзда та аеродинамічного опору. Це підтверджується результатами експлуатаційних досліджень і аналітичних оглядів [14; 15].

Витрата пального на один рейс визначається за формулою:

$$Q_n = \frac{L_{\text{заг}}(H_s + G_{pr} H_{pr})}{100} \quad (7)$$

де Q_n – витрата пального на рейс, л.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виклад основного матеріалу. Мобільні вогневі групи створені та функціонують практично в кожній військовій частині і перебувають у стані постійної бойової готовності, виконуючи завдання з локального захисту повітряного простору на визначених ділянках. Їх особовий склад, озброєння та технічні засоби постійно готові до негайного реагування на повітряні загрози, що дозволяє оперативно розгортати вогневі позиції та своєчасно відкривати вогонь по повітряних цілях.

Створення вогневих і мобільних вогневих груп стало вимушеним та об'єктивно необхідним кроком у відповідь на масовані та системні атаки ударними безпілотними літальними апаратами, які противник активно застосовує з метою ураження як військових, так і цивільних об'єктів. З огляду на

порівняно невисоку вартість таких БПЛА та можливість їх одночасного запуску у великій кількості, виникла потреба у створенні численних, мобільних і відносно недорогих засобів протидії, здатних ефективно працювати на малих висотах і в умовах складної повітряної обстановки.

Мобільні вогневі групи відіграють ключову роль у посиленні захисту стратегічно важливих об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури, а також мирних міст і населених пунктів нашої Держави. Завдяки своїй мобільності вони можуть швидко змінювати райони чергування, перекривати загрозливі напрямки, посилювати найбільш уразливі ділянки та діяти у взаємодії з іншими підрозділами сил безпеки і оборони.

Враховуючи те, що більш потужні та високотехнологічні засоби протиповітряної оборони виконують завдання на вищих ешелонах системи оборони повітряного простору, мобільні вогневі групи зосереджують свої зусилля на нижніх ешелонах, де основною загрозою є ударні безпілотні літальні апарати. Саме на них покладаються завдання з виявлення, супроводу та знищення БПЛА, особливо під час масованих атак, коли противник намагається перевантажити систему ППО. Таким чином, мобільні вогневі групи є невід'ємним елементом сучасної багатопланової оборони повітряного простору та відіграють вирішальну роль у зниженні ефективності ворожих повітряних ударів.

Мобільні вогневі групи, з урахуванням наявного в них озброєння та технічних можливостей, мають відносно невеликий радіус ефективної дії, що обумовлено дальністю ураження цілей. У зв'язку з цим командування різних рівнів вимушене постійно шукати шляхи підвищення ефективності їх застосування, зокрема шляхом збільшення загальної кількості вогневих і мобільних вогневих груп, коригування тактики їх дій, а також удосконалення матеріально-технічного забезпечення.

Збільшення кількості вогневих груп здійснюється з метою більш щільного прикриття повітряного простору на визначених напрямках та створення умов для організації загороджувального вогню. Саме загороджувальний вогонь, що ведеться одночасно кількома вогневими групами з різних позицій, значно підвищує ймовірність ураження ворожих повітряних цілей. За таких умов ефективність знищення ударних безпілотних літальних апаратів зростає навіть при застосуванні стрілецької зброї, яка за умови масованого та скоординованого вогню здатна створювати суцільну зону ураження на малих висотах.

Разом з тим створення позаштатних мобільних вогневих груп неминуче породжує одне з головних організаційних та матеріально-технічних питань - забезпечення таких груп відповідними транспортними засобами, насамперед автомобілями типу пікап. Пікапи є найбільш придатними для виконання завдань мобільних вогневих груп, оскільки дозволяють оперативно встановлювати кулемети та інше озброєння безпосередньо на кузові, забезпечуючи швидке розгортання та відкриття вогню.

Використання ж легкових автомобілів різних типів і груп експлуатації, але не пікапів - таких як джипи, седани, мікроавтобуси, оперативно-службові або автопатрульні автомобілі - хоча й можливе, проте має суттєві обмеження. На таких транспортних засобах відсутня можливість швидкого та безпечного встановлення кулеметів, а процес вивантаження та розгортання озброєння та відповідного обладнання займає значний час. Кожна зайва хвилина затримки зменшує шанси на своєчасне виявлення та ураження повітряної цілі. В умовах бойового застосування мобільних вогневих груп саме час є критично важливим фактором, який безпосередньо впливає на успішність виконання завдання. Водночас цей час може бути істотно скорочений за рахунок застосування легкових причепів із задалегідь встановленим та стаціонарно закріпленим озброєнням і обладнанням. Такі платформи дозволяють перевозити озброєння, бойове обладнання та інше оснащення у вже готовому до застосування стані. У результаті мобільна вогнева група після прибуття на позицію може практично одразу приступати до виконання бойового завдання, що значно підвищує оперативність, ефективність та загальну боездатність підрозділів під час відбиття масованих повітряних атак противника.

Таким чином, нарощування кількості мобільних вогневих груп за рахунок створення вогневих позицій на базі легкових причепів, удосконалення їх тактики дій та посилення матеріально-технічного забезпечення є необхідною умовою для підвищення результативності боротьби з масованими повітряними атаками противника та забезпечення надійного прикриття повітряного простору на тактичному рівні. Дообладнання звичайного легкового причепа озброєнням, бойовим обладнанням та іншим спеціалізованим оснащенням перетворює його на універсальну мобільну платформу, здатну забезпечити швидке розгортання, високу автономність та ефективне виконання бойових завдань мобільними вогневими групами в умовах сучасної повітряної загрози.

ВИСНОВКИ

Таким чином, важливим фактором є економічна вигода від використання легкових причепів у порівнянні з іншими варіантами, такими як пікапи чи інші спеціалізовані транспортні засоби. Вартість легкового причепа є значно нижчою, у кілька десятків разів, що робить їх більш доступними для оснащення великих кількостей підрозділів. За таких умов легкові причепа стають оптимальним варіантом для забезпечення мобільності та бойових можливостей підрозділів при мінімальних фінансових витратах. Цей підхід дозволяє не тільки економити бюджет, але й збільшувати кількість мобільних вогневих груп, що в свою чергу підвищує загальну боєздатність та ефективність сил, залучених до виконання завдань із протиповітряної оборони.

Крім того, нарощування кількості мобільних вогневих груп за рахунок створення вогневих позицій на базі легкових причепів, удосконалення їх тактики дій та посилення матеріально-технічного забезпечення є необхідною умовою для підвищення результативності боротьби з масованими повітряними атаками противника та забезпечення надійного прикриття повітряного простору на тактичному рівні. Дообладнання звичайного легкового причепа озброєнням, бойовим обладнанням та іншим спеціалізованим оснащенням перетворює його на універсальну мобільну платформу, здатну забезпечити швидке розгортання, високу автономність та ефективне виконання бойових завдань мобільними вогневими групами в умовах сучасної повітряної загрози.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Доктрина “Об’єднана логістика” (СП 4-00(30)03.01) : доктринальний документ. URL: <https://jurkniga.ua/contents/doktrina-obiednana-logistika.pdf> (дата звернення: 02.12.2025).
2. Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію : Закон України від 21.10.1993 № 3543-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3543-12> (дата звернення: 09.10.2025).
3. Бойовий статут Сухопутних військ “Транспортні операції та військові перевезення” (БП 4-142(11).01). URL: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/02/2_%D0%91%D0%9F-332.11.01-%D0%91%D0%A1-%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D-%D0%9E%D0%9F%D0%95%D0%A0-%D0%A2%D0%90-%D0%92%D0%86%D0%99%D0%A1-%D0%9F%D0%95%D0%A0-%D0%A1%D0%92-%D0%97%D0%A1%D0%A3.pdf (дата звернення: 21.11.2025).
4. AlliedJointMovementandTransportationDoctrine (AJP-4.4 Ed. B, Version 1). URL: https://www.coemed.org/files/stanags/01_AJP/ajp-4.4_edb_v1_e_2506.pdf (дата звернення: 28.09.2025).
5. Про автомобільний транспорт : Закон України від 05.04.2001 № 2344-III // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2344-14> (дата звернення: 13.12.2025).
6. Про Правила дорожнього руху : Постанова Кабінету Міністрів України від 10.10.2001 № 1306 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1306-2001-%D0%BF> (дата звернення: 15.12.2025).
7. Про оборону України : Закон України від 06.12.1991 № 1932-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1932-12> (дата звернення: 14.11.2025).
8. Про затвердження Положення про військово-транспортний обов’язок : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.12.2000 № 1921 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1921-2000-%D0%BF> (дата звернення: 07.11.2025).
9. Про затвердження Порядку ведення військового обліку транспортних засобів : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.06.2015 № 405 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/405-2015-%D0%BF> (дата звернення: 03.10.2025).
10. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Київ : Держстандарт України, 1998.
11. Правила експлуатації причепів і напівпричепів до легкових автомобілів : методичні рекомендації. Київ, 2019. URL: <https://hsc.gov.ua/index/poslugi/poslugi-servisnih-tsentriv-mvs/revestratsiya-transportnih-zasobiv/prichepi/> (дата звернення: 15.12.2025).
12. Волонтерська логістика в умовах війни: аналітичний огляд. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/bezpeka/volonterska-lohistyka-v-umovakh-viyny> (дата звернення: 03.12.2025).

13. Організація автомобільних перевезень : навчальний посібник. Левковець П.Р. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 352 с.
14. Методичні рекомендації з нормування витрат палива автомобільним транспортом. URL: <https://insat.org.ua/files/services/ldvpe/6/metod.pdf> (дата звернення: 03.12.2025).
15. Основи теорії транспортних процесів і систем : навчальний посібник. Вовк Ю.Я. Тернопіль : ТНТУ, 2021. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35983/1/OTTPS_Vovk.pdf (дата звернення: 14.09.2025).

REFERENCES

1. Doktryna "Obiednana lohistyka" (SP 4-00(30)03.01) [Doctrine "Joint Logistics" (SP 4-00(30)03.01)]. Retrieved from: <https://jurkniga.ua/contents/doktrina-obiednana-logistika.pdf> (accessed 02 December 2025) [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrainy "Pro mobilizatsiinu pidhotovku ta mobilizatsiiu" № 3543-XII [Law of Ukraine on Mobilization Preparation and Mobilization no. 3543-XII]. (1993, October 21). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3543-12> (accessed 09 October 2025) [in Ukrainian].
3. Boiovyi statut Sukhoputnykh viisk "Transportni operatsii ta viiskovi perevezennia" (BP 4-142(11).01) [Combat Statute of the Land Forces "Transport Operations and Military Transportation" (BP 4-142(11).01)]. Retrieved from: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/02/2_%D0%91%D0%9F-332.11.01-%D0%91%D0%A1-%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D-%D0%9E%D0%9F%D0%95%D0%A0-%D0%A2%D0%90-%D0%92%D0%86%D0%99%D0%A1-%D0%9F%D0%95%D0%A0-%D0%A1%D0%92-%D0%97%D0%A1%D0%A3.pdf (accessed 21 November 2025) [in Ukrainian].
4. Allied Joint Movement and Transportation Doctrine (AJP-4.4, Ed. B, Version 1). Retrieved from: https://www.coemed.org/files/stanags/01_AJP/ajp-4.4_edb_v1_e_2506.pdf (accessed 28 September 2025) [in English].
5. Zakon Ukrainy "Pro avtomobilnyi transport" № 2344-III [Law of Ukraine on Road Transport no. 2344-III]. (2001, April 5). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2344-14> (accessed 13 December 2025) [in Ukrainian].
6. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro Pravyla dorozhnoho rukhu" № 1306 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Traffic Rules no. 1306]. (2001, October 10). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1306-2001-%D0%BF> (accessed 15 December 2025) [in Ukrainian].
7. Zakon Ukrainy "Pro oboronu Ukrainy" № 1932-XII [Law of Ukraine on Defense of Ukraine no. 1932-XII]. (1991, December 6). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1932-12> (accessed 14 November 2025) [in Ukrainian].
8. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro zatverdzhennia Polozhennia pro viiskovo-transportnyi oboviazok" № 1921 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Military Transport Duty no. 1921]. (2000, December 28). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1921-2000-%D0%BF> (accessed 07 November 2025) [in Ukrainian].
9. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia viiskovoho obliku transportnykh zasobiv" № 405 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Military Registration of Vehicles no. 405]. (2015, June 17). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/405-2015-%D0%BF> (accessed 03 October 2025) [in Ukrainian].
10. DSTU 3587-97. Bezpeka dorozhnoho rukhu. Avtomobilni dorohy, vulytsi ta zaliznychni pereizdy. Vymohy do ekspluatatsiinoho stanu [State Standard 3587-97. Road Traffic Safety. Roads, Streets and Railway Crossings. exploitation requirements]. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy, 1998 [in Ukrainian].
11. Pravyla ekspluatatsii prychipiv i napivprychipiv do lehkovykh avtomobiliv [Rules for the Operation of Trailers and Semi-Trailers for Passenger Cars]. Kyiv, 2019. Retrieved from: <https://hsc.gov.ua/index/poslugi/poslugi-servisnih-tsentriv-mvs/rejestratsiya-transportnih-zasobiv/prichepi/> (accessed 15 December 2025) [in Ukrainian].
12. Volonterska lohistyka v umovakh viiny: analitychnyi ohliad [Volunteer Logistics in Wartime: Analytical Review]. Retrieved from: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/bezpeka/volonterska-lohistyka-v-umovakh-viiny> (accessed 03 December 2025) [in Ukrainian].
13. Levkovets P. R. (2018). Orhanizatsiia avtomobilnykh perevezen [Organization of Road Transport]. Kyiv : Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

14. Metodichni rekomendatsii z normuvannia vytrat palyva avtomobilnym transportom [Methodological Recommendations for Fuel Consumption Standardization in Road Transport]. Retrieved from: <https://insat.org.ua/files/services/ldvpe/6/metod.pdf> (accessed 03 December 2025) [in Ukrainian].

15. Vovk Yu. Ya. (2021). Osnovy teorii transportnykh protsesiv i system [Fundamentals of the Theory of Transport Processes and Systems]. Ternopil : TNTU. Retrieved from: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35983/1/OTTPS_Vovk.pdf (accessed 14 September 2025) [in Ukrainian].

V. Fysun. Justification of the necessity of introducing military units of the national guard of ukraine and the use of light trailers during the performance of combat tasks by mobile fire groups.

The enemy continuously employs strike unmanned aerial vehicles (UAVs) to conduct aerial attacks against Ukrainian cities. Every night and on a daily basis, personnel of the National Guard of Ukraine perform combat duty as part of mobile fire groups in order to effectively accomplish tasks related to the air defense coverage of critical infrastructure facilities, as well as other state and strategic military assets that may potentially be targeted by UAVs of the “Shahed” type.

The establishment of mobile fire groups is a forced but necessary measure. Their primary purpose is to enhance the protection of Ukrainian airspace, provide localized defense of critical infrastructure, and safeguard state and strategic military facilities that may become targets of enemy UAV strikes.

The use of light trailers towed by passenger vehicles of various operational categories for the execution of combat tasks by mobile fire groups represents an important step toward increasing the effectiveness of countering aerial threats and expanding the number of firing positions during air raid alerts. This approach enables the creation of additional mobile platforms for the deployment of weapon systems, which can rapidly relocate, providing a significant advantage in a dynamic combat environment.

Equipping light trailers with weapon-mounted turrets and other combat modules makes it possible to establish fully functional firing positions for mobile fire groups capable of effectively delivering fire support and engaging enemy aerial targets. Such trailers can be utilized not only with passenger vehicles but also with other types of platforms, including buggies, all-terrain vehicles (ATVs), and specialized unit vehicles. This significantly enhances mobility and the operational employment of firepower assets in various conditions, including complex terrain and confined areas.

In addition, a key factor is the economic efficiency of using light trailers compared to alternative solutions such as pickup trucks or other specialized vehicles. The cost of a light trailer is significantly lower—by several orders of magnitude—making them more accessible for equipping a large number of units. Under such conditions, light trailers represent an optimal solution for ensuring both mobility and combat capability of units while minimizing financial expenditures. This approach not only reduces budgetary costs but also increases the number of mobile fire groups, thereby enhancing the overall combat effectiveness and operational capability of forces involved in air defense missions.

Key words: airspace protection over Ukraine, mobile fire groups, protection of civilian lives, protection of state assets, light trailers.

ФИСУН Володимир Вікторович, викладач кафедри автомобільної техніки навчально-наукового інституту логістики Національної академії Національної гвардії України, vavanfisun@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9113-8279>

Volodymyr FYSUN, lecturer at the department of automotive engineering, educational and scientific Institute of logistics, National academy of the National guard of Ukraine, vavanfisun@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-9113-8279>

Дата надходження статті до видання: 10.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

<https://doi.org/10.36910/wnh5nj60>

Холодова О.О., Бугайова М.О., Холодов О.В.
*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Харків, Україна*

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ РЕГУЛЬОВАНИХ І НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ З УРАХУВАННЯМ СКЛАДНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ВЗАЄМОДІЙ

Проведено критичний аналіз класичних і сучасних методик оцінки безпеки регульованих та нерегульованих перехресть з урахуванням складності транспортних взаємодій. Показано, що підходи, засновані виключно на статистиці ДТП або підрахунку конфліктних точок, мають обмежені можливості щодо виявлення потенційно небезпечних ситуацій і недостатньо враховують взаємодії за участю вразливих учасників дорожнього руху — пішоходів, велосипедистів і користувачів громадського транспорту.

На основі узагальнення досліджень обґрунтовано доцільність переходу від жорстко фіксованих емпіричних коефіцієнтів до універсального принципу формування вагових показників конфліктних точок. Запропоновано узагальнений підхід до визначення вагових коефіцієнтів конфліктних взаємодій, що поєднує характер транспортної взаємодії і рівень уразливості найбільш незахищеного учасника конфлікту.

Розроблено універсальну формулу інтегрального показника складності перехрестя, яка дозволяє кількісно враховувати різні типи конфліктних взаємодій, у тому числі за участю пішоходів, велосипедистів і рейкового міського транспорту, без введення значної кількості окремих емпіричних коефіцієнтів. Запропонований показник інтерпретується як індикатор потенційної небезпеки перехрестя, що узгоджується з концепцією surrogate safety analysis.

На прикладі типового міського нерегульованого перехрестя показано, що врахування конфліктів за участю вразливих учасників дорожнього руху може істотно змінювати кінцеву оцінку складності та підвищувати категорію перехрестя за рівнем потенційної небезпеки. Це підтверджує доцільність використання запропонованого підходу для порівняльної оцінки альтернативних схем організації дорожнього руху та пріоритетизації заходів з підвищення безпеки.

Ключові слова: безпека дорожнього руху, перехрестя, конфліктні точки, транспортні взаємодії, вразливі учасники, інтегральний показник складності, вагові коефіцієнти

ВСТУП

Статистичні дані щодо кількості зареєстрованих дорожньо-транспортних пригод (ДТП) за 2016–2025 роки, отримані з офіційних відкритих матеріалів Патрульної поліції України [1], відображають динаміку аварійності по регіонах України та є актуальними на момент проведення дослідження, оскільки базуються на даних державного органу, що здійснює безпосередній облік ДТП. Аналіз статистики ДТП за причинами свідчить, що значна частка аварій з загиблими та травмованими пов'язана з порушеннями правил проїзду перехресть. Зокрема, за період 2025 року зафіксовано 1218 ДТП з загиблими та/або травмованими внаслідок порушення правил проїзду нерегульованих перехресть, що супроводжувалося загибеллю 70 осіб та травмуванням 1704 осіб.

Отримані дані підтверджують, що нерегульовані перехрестя належать до найбільш аварійно небезпечних елементів вулично-дорожньої мережі (ВДМ). На відміну від регульованих перехресть, на яких конфлікти частково усуваються за рахунок фаз світлофорного регулювання, на нерегульованих перехрестях значна частина потенційно небезпечних ситуацій залежить від дотримання водіями правил пріоритету та суб'єктивної оцінки дорожньої обстановки. Це зумовлює потребу у науково обґрунтованій оцінці рівня безпеки їх функціонування з використанням спеціалізованих методик аналізу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Використання виключно статистики ДТП не дає змоги повною мірою оцінити рівень безпеки перехресть, оскільки така інформація відображає лише реалізовані аварійні події та не враховує латентні конфлікти між учасниками дорожнього руху. У зв'язку з цим серед відомих підходів до оцінки безпеки дорожнього руху поширеним є метод аналізу конфліктних точок, який дозволяє кількісно охарактеризувати ступінь небезпеки як для регульованих, так і для нерегульованих перехресть шляхом виявлення та аналізу потенційно небезпечних взаємодій між транспортними та пішохідними потоками.

Водночас у ряді досліджень оцінювання стану ВДМ базується переважно на показниках швидкості руху та рівня обслуговування (LOS), визначених за методикою HCM, без прямого врахування показників безпеки руху [2]. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність функціонування

перехресть з точки зору пропускної здатності та комфорту руху, однак є обмеженим для аналізу рівня безпеки, особливо в умовах складної конфліктної структури перехресть.

З огляду на це доцільним є подальший аналіз особливостей формування конфліктних ситуацій на перехрестях різних типів, що потребує їх систематизації та класифікації з урахуванням способу регулювання та планувально-геометричних параметрів, які безпосередньо впливають на складність організації руху.

Окрему групу становлять сучасні системні підходи до оцінки безпеки перехресть, що базуються на аналізі складності транспортних взаємодій у межах імітаційного моделювання. Так, у роботі [3] запропоновано багатовимірну модель оцінки складності перехресть за показниками щільності взаємодій, невпорядкованості руху та інтегрального ризику. Водночас орієнтація методики на тестування автономних транспортних систем і відсутність прямого зв'язку з показниками аварійності обмежують можливості її практичного використання для оцінки безпеки реальних міських перехресть.

У низці досліджень [4] безпека нерегульованих перехресть оцінюється на основі проксимальних індикаторів (TTC, PET, DR), які дозволяють аналізувати потенційно небезпечні ситуації без залучення статистики ДТП. Зокрема, метод конфліктних ситуацій у поєднанні з surrogate safety measures застосовується для оцінки як рівня безпеки, так і пропускної здатності перехресть. В той же час відсутність прямого зв'язку між значеннями проксимальних показників і реальною аварійністю, а також висока чутливість результатів до якості вихідних даних обмежують можливості їх практичного використання.

У сучасних дослідженнях безпека дорожнього руху все частіше розглядається через призму оцінки складності транспортного середовища. Так, у роботі [5] запропоновано системну методику кількісної оцінки складності дорожнього середовища на основі теорії потенціальних полів та методу аналізу ієрархій. Разом з цим орієнтація методики на автономні транспортні засоби (ТЗ), високий рівень абстракції та відсутність прямого зв'язку з показниками аварійності обмежують можливості її використання для оцінки безпеки регульованих і нерегульованих перехресть.

У деяких країнах, що розвиваються, зокрема в Непалі, підвищена увага приділяється комплексному підходу до дорожньої безпеки, включаючи правові, інфраструктурні та поведінкові аспекти, що підкреслює важливість інтеграції різних факторів при оцінці безпеки перехресть [6].

У низці сучасних досліджень безпека нерегульованих перехресть аналізується через вплив складності транспортного середовища на поведінку водіїв. Зокрема, результати натуралістичного польового експерименту в [7] свідчать, що такі параметри перехрестя, як напрям в'їзду, характер маневру та динамічна насиченість транспортного середовища, мають статистично значущий вплив на швидкісні характеристики руху та момент прийняття рішення водієм. Водночас обмежений обсяг вибірки та відсутність прямого зв'язку з показниками аварійності зумовлюють необхідність поєднання таких підходів із методами аналізу конфліктних ситуацій.

Узагальнюючий огляд сучасних досліджень з аналізу поведінки та безпеки на перехрестях подано у роботі [8], де перехрестя розглядаються як складні динамічні системи взаємодії ТЗ, водіїв і пішоходів. Запропонована авторами класифікація методів аналізу безпеки та поведінки, а також узагальнення застосовуваних показників ефективності створюють теоретичну основу для подальшого розвитку автоматизованих підходів до оцінки безпеки регульованих і нерегульованих перехресть.

Окрему групу сучасних підходів становлять методи аналізу траєкторій ТЗ із використанням алгоритмів машинного навчання. Так, у роботі [9] запропоновано метод автоматичної ідентифікації типу регулювання перехресть на основі GPS-траєкторій, який ґрунтується на аналізі колективної поведінки транспортних потоків (ТП), епізодів зупинок і уповільнень. Отримані з траєкторій швидкісні та зупиночні характеристики використовуються для класифікації під'їздів до перехресть за типом регулювання, при цьому досягається висока точність (95–97 %) [10]. Водночас метою дослідження є визначення типу організації руху, а не оцінка рівня безпеки, що зумовлює відсутність аналізу конфліктних ситуацій, показників аварійності або surrogate safety measures. У зв'язку з цим можливості безпосереднього застосування такого підходу для оцінки небезпеки регульованих і нерегульованих перехресть є обмеженими.

Останнім часом у дослідженнях також застосовуються інформаційно-теоретичні підходи до оцінки складності транспортних сценаріїв. Так, у роботі [11] запропоновано ентропійну модель багатовимірної оцінки складності дорожнього середовища з урахуванням учасників руху, статичних і динамічних елементів. Попри високу формалізацію та можливість застосування до реальних даних, запропонований підхід орієнтований переважно на задачі навчання та тестування автономних ТЗ і не

забезпечує прямої інженерної інтерпретації результатів з точки зору рівня небезпеки перехресть або кількості конфліктних ситуацій.

Окремий напрям досліджень присвячено оцінюванню впливу активних дорожніх знаків, зокрема світлодіодних (LED) STOP-знаків, на безпеку дорожнього руху та поведінку водіїв. У роботі [12] на основі поперечних спостережень за реальними умовами руху проаналізовано ефективність впровадження активної світлової індикації на нерегульованих перехрестях із підвищеним рівнем аварійності. Отримані результати свідчать про статистично значуще зростання рівня дотримання водіями вимог знака STOP, що пояснюється підвищенням помітності знака, зростанням уважності водіїв та покращенням сприйняття дорожньої ситуації, особливо в умовах складного середовища руху. Водночас зазначений підхід орієнтований переважно на поведінкові та експлуатаційні показники й не передбачає формалізованого аналізу конфліктних ситуацій або surrogate safety measures, що обмежує можливості комплексної оцінки рівня небезпеки перехрестя.

Окремий напрям сучасних досліджень безпеки нерегульованих перехресть пов'язаний із впровадженням інтелектуальних транспортних систем попередження про конфлікти. Так, у роботі [13] узагальнено результати оцінювання ефективності системи попередження про конфлікти на перехрестях (Intersection Conflict Warning System, ICWS), яка базується на використанні активних попереджувальних знаків та сенсорів виявлення ТЗ. Аналіз літературних джерел свідчить, що застосування ICWS сприяє покращенню поведінки водіїв, зокрема зменшенню швидкості під'їзду до перехрестя, скороченню часу реакції, збільшенню прийнятних інтервалів у потоці та зниженню кількості конфліктних ситуацій. Водночас оцінювання ефективності системи здійснюється переважно за поведінковими та операційними показниками, без прямого кількісного аналізу рівня аварійності або інтегральних показників безпеки, що обмежує можливості використання таких підходів для комплексної оцінки безпеки нерегульованих перехресть з урахуванням складності транспортних взаємодій.

Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що існуючі підходи до оцінки безпеки перехресть істотно різняться за вихідними даними, рівнем деталізації та сферою застосування. Методи, засновані на статистиці ДТП, не дозволяють виявляти потенційно небезпечні ситуації, тоді як surrogate safety measures та поведінкові показники чутливі до умов спостереження і не завжди корелюють з реальною аварійністю. Системні та імітаційні підходи забезпечують комплексний опис складності транспортного середовища, однак характеризуються високим рівнем абстракції та обмеженою інженерною інтерпретацією. Попри орієнтацію на автономні ТЗ, такі роботи формують методологічну основу для оцінки складності середовища. Все це зумовлює необхідність подальшого розвитку методик оцінки безпеки перехресть, орієнтованих на поєднання локальних конфліктних показників із системними характеристиками складності руху.

У практиці транспортного планування широко застосовуються показники частоти ДТП та коефіцієнта аварійності (crash rate), які використовуються для ранжування перехресть за рівнем небезпеки з урахуванням транспортної експозиції. Такий підхід рекомендований у керівних документах Federal Highway Administration (FHWA, США), зокрема в межах програм підвищення безпеки місцевих і сільських доріг, та дозволяє визначати пріоритетність впровадження інженерних заходів безпеки [14]. В той же час навіть за однакових значень коефіцієнта аварійності перехрестя можуть суттєво відрізнятися за конфліктною структурою, кількістю маневрів і когнітивним навантаженням на водія, що не відображається в агрегованих статистичних показниках. Згідно з рекомендаціями FHWA та AASHTO, такі геометричні параметри, як обмежена видимість на підходах і перекошена геометрія перехрестя, істотно підвищують ризик виникнення аварійних ситуацій за рахунок ускладнення візуального сприйняття та збільшення часу перебування ТЗ у зоні конфлікту. Разом з тим у більшості існуючих методик зазначені чинники розглядаються ізольовано та не інтегруються в узагальнений кількісний показник складності транспортних взаємодій на перехрестях.

У дослідженні [15] у межах інтелектуальних транспортних систем керування перехрестями розглядається як складний процес, зумовлений різноманітністю поведінки учасників дорожнього руху. Значна частина схожих наукових робіт спрямована на підвищення ефективності пропуску ТП та забезпечення безпеки руху шляхом застосування алгоритмів оптимізації швидкості, планування траєкторій руху, надання пріоритету спеціальному транспорту, а також систем виявлення потенційних конфліктів і попередження аварійних ситуацій. Разом з тим зазначені підходи орієнтовані переважно на локальні задачі управління рухом і не передбачають формалізованої кількісної оцінки загальної складності транспортних взаємодій на перехрестях.

Ступінь складності перехрестя значною мірою визначається його планувальними характеристиками. Зокрема, на складність впливають: кількість смуг руху (перехрестя з великою кількістю смуг є більш вимогливими для водіїв, оскільки потребують своєчасного вибору правильної смуги відповідно до запланованого напрямку); наявність світлофорного регулювання (світлофори знижують когнітивне навантаження на водіїв, регулюючи черговість проїзду та зменшуючи кількість рішень, які необхідно приймати самостійно); тип геометрії перехрестя (деякі конфігурації, як-от кільцеві або турбокільцеві перехрестя, вимагають дотримання специфічних правил руху та певного рівня навичок, що підвищує загальну складність); інтенсивність ТП (більший обсяг транспорту призводить до зростання конфліктних ситуацій і ускладнює процес перетинання); інфраструктура для пішоходів і велосипедистів (наявність пішохідних переходів, велосипедних смуг та інших засобів забезпечення безпеки може як спростити, так і ускладнити організацію руху залежно від їхньої ефективності); географічні та кліматичні умови (такі чинники, як ухили, стан дорожнього покриття, обмежена видимість або несприятливі погодні умови, також впливають на загальну складність ділянки); особливості організації руху та чинні ПДР (специфічні правила (пріоритет, обгони тощо) можуть підвищити складність орієнтування на перехресті). Узагальнюючи, складність перехрестя є результатом взаємодії цих чинників і може сприйматися суб'єктивно, залежно від досвіду та навичок водіїв [16].

Складні перехрестя мають не лише високий рівень конфліктності ТП, але й геометричну та топологічну складність, що ускладнює їх точну ідентифікацію в дорожніх мережах [17]. Існуючі методи, які базуються на геометричних та топологічних статистиках, є похибковими, масштабозалежними та не завжди забезпечують цілісність перехрестя. Відповідно, точна інтегральна ідентифікація перехрестя є необхідною передумовою для коректної оцінки його складності та потенційної небезпеки.

У роботі [18] запропоновано кількісну оцінку складності транспортного середовища міських доріг на основі концепції «людина – транспорт – дорога» з поділом на статичну та динамічну складові. Для цього використано метод сірої реляційної аналізи та модифіковану гравітаційну модель. Попри комплексний характер запропонованого підходу та його орієнтацію на системний опис транспортного середовища, методика зосереджена переважно на задачах руху автономних ТЗ і не забезпечує прямого зв'язку між отриманими показниками складності та рівнем небезпеки або аварійності на перехрестях, що обмежує її практичне використання в інженерній оцінці безпеки дорожнього руху.

У ряді робіт зроблено спроби вдосконалення surrogate safety measures шляхом урахування поведінкових характеристик водія. Так, у роботі [19] складність дорожнього середовища оцінюється на основі реакції водія з використанням методу головних компонент для визначення ваг впливових факторів. Отримані результати свідчать про зменшення хибних спрацювань порівняно з показником TTC (Time To Collision). Водночас запропонований підхід орієнтований на умови позовжнього руху (car-following), не враховує багатопотокові конфлікти та не забезпечує інтегральної оцінки небезпеки перехресть, що обмежує його застосування в задачах аналізу складних вузлів ВДМ.

Сучасні підходи до оцінювання складності транспортних ситуацій дедалі частіше ґрунтуються на багатокритеріальних та нечітких методах прийняття рішень [20]. Водночас такі підходи не мають уніфікованих кількісних критеріїв і значною мірою залежать від експертних оцінок, що обмежує можливості об'єктивного визначення рівня складності та небезпеки дорожнього руху на конкретних елементах транспортної інфраструктури, зокрема на міських перехрестях.

Однією з найбільш поширених у вітчизняній практиці методик кількісної оцінки складності перехресть є підхід, що базується на підрахунку конфліктних точок різних типів, що виникають на певному перехресті. Рівень складності визначається за п'ятибальною шкалою [21], заснованою на розрахунку показника складності m , що обчислюється за формулою

$$m = 1 \cdot N_1 + 3 \cdot N_2 + 5 \cdot N_3, \quad (1)$$

де N_1 — кількість конфліктних точок розділення (оцінюються в 1 бал), N_2 — точок злиття (оцінюються в 3 бали), N_3 — точок перетинання (оцінюються в 5 балів). Інтерпретація показника складності: $m < 40$ - перехрестя вважається нескладним, $40 \leq m < 80$ - середній рівень складності, $80 \leq m < 150$ - складне перехрестя, $m \geq 150$ - дуже складне перехрестя.

Варто зауважити, що в поданій методиці оцінювання складності перехрестя, яка базується на підрахунку кількості конфліктних точок трьох типів — розділення, злиття та перетинання — не

враховано конфлікти за участю пішоходів. Необхідно відзначити, що попри очевидну актуальність проблеми, фактично відсутня не лише кількісна оцінка конфліктів між ТЗ та пішоходами, а й велосипедистами чи трамваями. Разом з тим, при детальному аналізі конкретного перехрестя та побудові схем організації руху такі конфліктні точки мають бути обов'язково відображені [22]. Дослідження взаємодії автомобілів із пішоходами певною мірою розвинуті в межах вивчення конфліктних ситуацій, який базується на натурному спостереженні за «передаварійними» подіями, коли учасники руху змушені здійснювати екстрені дії для уникнення зіткнення. Таких випадків значно більше, ніж реальних ДТП, що дозволяє швидше виявляти небезпечні місця. Метод дає змогу враховувати конфлікти «ТЗ – пішохід», застосовувати відеофіксацію та проводити аналіз за схемою «до і після». Водночас він потребує значних ресурсів, підготовлених спостерігачів і не забезпечує єдиної інтегральної оцінки складності перехрестя, а лише порівняльну характеристику рівня небезпеки. Крім того, питання врахування велосипедного руху та трамвайного транспорту в межах даного підходу залишається недостатньо опрацьованим.

Формула (1) передбачає лише взаємодію ТП, що створює обмежене уявлення про реальний рівень складності, особливо у випадках інтенсивного пішохідного руху. Такий підхід не дозволяє об'єктивно оцінити потенційні небезпеки, що виникають при перетині траєкторій пішоходів та ТЗ, хоча в умовах міських вулиць такі конфлікти часто є критичними з точки зору безпеки. Отже, для повнішої оцінки складності перехрестя доцільно доповнити методику врахуванням пішохідних конфліктних точок із відповідними ваговими коефіцієнтами.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є критичний аналіз існуючих методик оцінки безпеки регульованих і нерегульованих перехресть з урахуванням складності транспортних взаємодій, а також обґрунтування можливостей їх удосконалення шляхом уточнення системи конфліктних показників і принципів формування вагових коефіцієнтів з урахуванням уразливості учасників дорожнього руху.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для об'єктивнішої оцінки складності перехрестя з урахуванням усіх учасників дорожнього руху, зокрема пішоходів, до традиційної методики розрахунку показника складності було внесено уточнення. До трьох основних типів конфліктних точок (розділення, злиття та перетинання ТП) додано четвертий тип — конфліктні точки взаємодії ТЗ із пішоходами. Враховуючи вразливість пішоходів та потенційні наслідки таких конфліктів, їм було призначено ваговий коефіцієнт 4 (траєкторія його руху зазвичай передбачувана; ризик серйозних наслідків вищий, ніж при конфліктах ТЗ – ТЗ, але з нижчою імовірністю події, ніж у перетинаючих потоках ТЗ). Запропоноване значення вагового коефіцієнта має експертний характер і базується на поєднанні ймовірності виникнення конфлікту та тяжкості можливих наслідків, що узгоджується з підходами surrogate safety analysis. Таким чином, складність перехрестя доцільно розглядати не як прямий показник аварійності, а як індикатор потенційної небезпеки, що формується через кількість та типи конфліктних взаємодій. У зв'язку з цим формула для розрахунку складності набуває вигляду

$$m = 1 \cdot N_1 + 3 \cdot N_2 + 5 \cdot N_3 + 4 \cdot N_4, \quad (2)$$

де N_4 — кількість конфліктних точок ТЗ з пішоходами (оцінюються в 4 бали).

Такий підхід дозволяє точніше відображати реальний рівень складності та безпеки перехрестя в умовах інтенсивного пішохідного руху.

Запропоноване доповнення класичної формули розрахунку складності перехрестя шляхом урахування конфліктних точок типу «ТЗ – пішохід» із фіксованим ваговим коефіцієнтом дозволяє частково врахувати вплив вразливих учасників дорожнього руху на рівень потенційної небезпеки. Одночасно таке розширення породжує низку методичних питань, пов'язаних із оцінкою інших типів конфліктних взаємодій, зокрема «ТЗ – велосипедист», «велосипедист – пішохід», «ТЗ – трамвай» та комбінованих багатосуб'єктних конфліктів.

Фіксоване задання окремого вагового коефіцієнта лише для одного типу взаємодії («ТЗ – пішохід») не дозволяє забезпечити методичну цілісність підходу, оскільки інші конфліктні ситуації, що потенційно характеризуються підвищеним ризиком травматизму або значною тяжкістю наслідків, залишаються поза межами кількісної оцінки. У такому випадку виникає необхідність або подальшого емпіричного задання великої кількості окремих коефіцієнтів для кожної пари учасників руху, або формування універсального принципу їх визначення.

З огляду на зазначене, доцільним є застосування узагальненого підходу до оцінки конфліктних взаємодій, який ґрунтується на концепції уразливості учасників дорожнього руху. В межах цього підходу ваговий коефіцієнт конфліктної точки визначається не стільки конкретно парою взаємодіючих учасників, скільки рівнем уразливості найбільш незахищеного з них.

Такий підхід узгоджується з сучасними принципами забезпечення безпеки дорожнього руху, зокрема концепціями Vision Zero та Sustainable Urban Mobility Planning, відповідно до яких пріоритет надається захисту вразливих учасників — пішоходів, велосипедистів та користувачів громадського транспорту.

У межах запропонованої методики всі учасники дорожнього руху класифікуються за зростанням рівня уразливості таким чином:

1. ТЗ індивідуального користування (легкові автомобілі);
2. Великогабаритні ТЗ (вантажні автомобілі, автобуси);
3. Рейковий міський транспорт (трамвай);
4. Велосипедисти;
5. Пішоходи.

Запропонована ієрархія відображає поєднання фізичної захищеності учасника, масо-габаритних характеристик ТЗ, можливості активного маневрування та ймовірної тяжкості наслідків у разі конфліктної взаємодії. Ваговий коефіцієнт конфліктної точки пропонується визначати як добуток базової ваги типу конфліктної взаємодії та коригуючого коефіцієнта уразливості

$$K = K_{\text{тип}} \cdot K_{\text{ур}}, \quad (3)$$

де $K_{\text{тип}}$ — базовий коефіцієнт, що враховує характер взаємодії ТП (розділення, злиття, перетин); $K_{\text{ур}}$ — коефіцієнт, що враховує рівень уразливості найбільш незахищеного учасника конфлікту.

Базові значення $K_{\text{тип}}$ залишаються відповідними до класичної методики (розділення потоків — 1; злиття потоків — 3; перетин потоків — 5). Коригуючі коефіцієнти уразливості запропоновано встановити на експертній основі з урахуванням тяжкості можливих наслідків: легковий автомобіль — 1,0; вантажний ТЗ / автобус — 1,1; трамвай — 1,2; велосипедист — 1,4; пішохід — 1,6. У випадку багатосуб'єктної взаємодії визначальним вважається учасник з найбільшим значенням коефіцієнта уразливості. З урахуванням запропонованого підходу показник складності перехрестя може бути поданий у вигляді

$$m = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_{\text{тип } i} \cdot K_{\text{ур } i}$$

де N_i — кількість конфліктних точок i -го типу; $K_{\text{тип } i}$ — коефіцієнт характеру взаємодії; $K_{\text{ур } i}$ — коефіцієнт уразливості.

Такий підхід дозволяє перейти від жорстко фіксованих коефіцієнтів для окремих пар учасників до універсальної методики, яка забезпечує цілісну та масштабовану оцінку складності і потенційної небезпеки перехрестя з урахуванням усіх учасників дорожнього руху. Запропонована методика забезпечує можливість кількісної оцінки будь-якого типу конфліктних взаємодій; узгоджується з європейськими підходами до пріоритетності вразливих учасників; не потребує введення великої кількості емпіричних коефіцієнтів; створює передумови для подальшої калібровки на основі статистики ДТП та даних відеоспостережень.

Для ілюстрації впливу врахування уразливих учасників дорожнього руху на результат оцінки складності розглянемо типове чотиристороннє міське перехрестя з такими характеристиками: по одній смузі руху в кожному напрямку; нерегульовані пішохідні переходи на всіх підходах; суміщений рух легкових автомобілів, громадського транспорту та велосипедистів; відсутність світлофорного регулювання.

Відповідно до традиційного підходу, що базується на підрахунку конфліктних точок ТП, для даного перехрестя було визначено кількість точок розділення потоків — 8; кількість точок злиття потоків — 8; кількість точок перетинання потоків — 16. Показник складності визначається за формулою (1) та становить 112. Згідно з прийнятою шкалою інтерпретації, перехрестя належить до об'єктів до складних ($80 \leq m < 150$).

На перехресті можуть бути передбачені велосмуги або велодоріжки залежно від функціонального типу вулиці та прийнятого проектного рішення, оскільки зазначені елементи

формують різні типи конфліктних точок і потребують різного підходу до урахування уразливості учасників дорожнього руху (див. рис. 1).

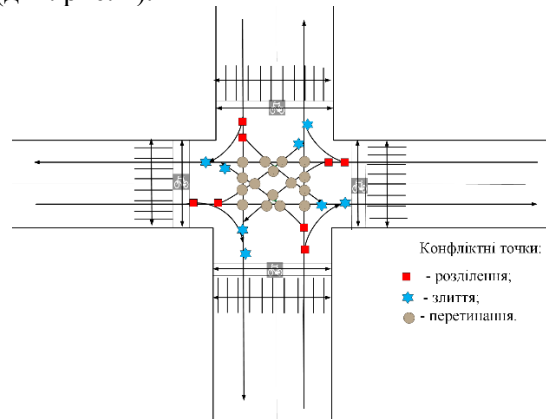


Рисунок 1 - Схема конфліктних взаємодій між учасниками дорожнього руху на міському перехресті за класичною методикою

У межах даного дослідження для ілюстрації методики оцінювання прийнято варіант організації руху з влаштуванням велодоріжок, що дає змогу розглядати велосипедистів як окрему уразливу категорію та чітко ідентифікувати додаткові конфліктні точки на перехресті (див. рис. 2).

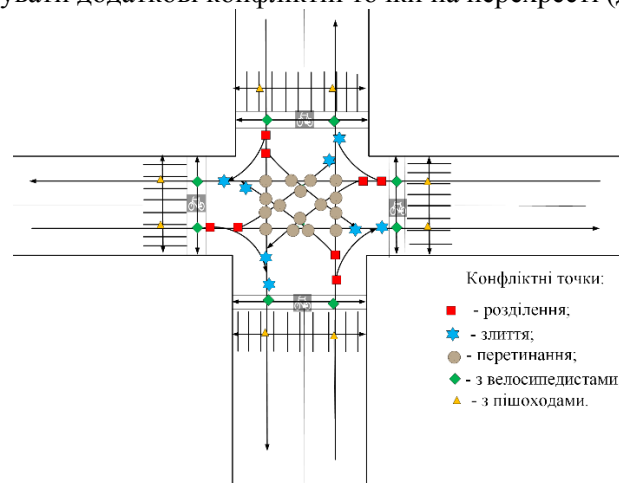


Рисунок 2 - Схема конфліктних взаємодій між учасниками дорожнього руху на міському перехресті за запропонованою методикою

У варіанті організації дорожнього руху з влаштуванням велодоріжок на перехресті додатково виникають конфліктні точки типу «ТЗ – пішохід» та «ТЗ – велосипедист». Кількість конфліктів першого типу становить 8, другого — також 8. З урахуванням коефіцієнтів уразливості, що дорівнюють відповідно 4 та 3 (згідно формули (2), додатковий показник складності становить 56. Хоча формула (2) розглядається як проміжний варіант, що демонструє обмеження фіксованого підходу та слугує обґрунтуванням переходу до узагальненої моделі (4). Таким чином, загальний показник складності перехрестя зростає з 112 до 168, що свідчить про істотний вплив уразливих учасників дорожнього руху на рівень конфліктності. Перехрестя вже є дуже складним ($m \geq 150$).

Тож, класичний підхід недооцінює потенційний рівень небезпеки перехрестя в умовах інтенсивного пішохідного та велосипедного руху, оскільки ігнорує конфлікти з високою тяжкістю можливих наслідків. Запропоноване розширення методики дозволяє більш адекватно відобразити реальну складність транспортних взаємодій та потенційну небезпеку елементів ВДМ.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати свідчать, що запропонований підхід до оцінки складності перехресть із урахуванням коефіцієнтів уразливості не змінює базової логіки класичної методики, яка ґрунтується на підрахунку та класифікації конфліктних точок, проте істотно впливає на інтерпретацію кінцевого результату.

Зокрема, включення у розрахунок конфліктів за участю вразливих учасників дорожнього руху призводить до зростання інтегрального показника складності та, відповідно, до зміни категорії перехрестя за рівнем потенційної небезпеки.

На прикладі типового міського чотиристороннього перехрестя показано, що класична методика може недооцінювати рівень потенційної небезпеки в умовах інтенсивного пішохідного та велосипедного руху, оскільки конфлікти з високою тяжкістю можливих наслідків або не враховуються взагалі, або мають таку саму вагу, як і конфлікти між ТЗ. Запропоноване розширення дозволяє більш адекватно відобразити реальну складність транспортних взаємодій, особливо в умовах формування ВДМ, орієнтованих на пріоритет вразливих учасників.

Важливо зазначити, що використання коефіцієнтів уразливості не трансформує показник складності у прямий показник аварійності. Натомість він набуває значення індикатора потенційної небезпеки, що узгоджується з сучасними підходами surrogate safety analysis та дозволяє використовувати результати оцінювання для порівняльного аналізу альтернативних схем організації дорожнього руху, а також для пріоритезації заходів з підвищення безпеки.

Разом із тим запропонована методика має певні обмеження. Значення коригуючих коефіцієнтів уразливості на даному етапі мають експертний характер і не базуються безпосередньо на статистиці ДТП. Крім того, методика не враховує вплив інтенсивності руху, швидкісних режимів та часової варіабельності транспортних і пішохідних потоків, що може впливати на фактичний рівень ризику.

Водночас простота формалізації та універсальність запропонованого підходу створюють передумови для його подальшого розвитку. Зокрема, методика може бути доповнена процедурами калібрування вагових коефіцієнтів на основі статистики ДТП, даних відеоаналізу конфліктних ситуацій та експертних оцінок, що дозволить підвищити її точність та практичну цінність.

Подальший розвиток запропонованого підходу доцільно пов'язувати з розширенням класифікації конфліктних взаємодій між учасниками дорожнього руху за рахунок таких категорій, як «ТЗ – пішохід», «ТЗ – велосипедист», «велосипедист – пішохід», а також комбінованих багатосуб'єктних конфліктів за участю рейкового транспорту. Такий підхід дозволить більш повно охопити різноманіття реальних транспортних ситуацій, характерних для сучасних міських перехресть. Найбільш методично складним елементом подальшого розвитку є обґрунтування коригуючих вагових коефіцієнтів для різних типів конфліктних взаємодій. Перспективним напрямом є поєднання статистичного аналізу ДТП, досліджень передаварійних ситуацій на основі відеоспостереження та експертних оцінок, що дозволить перейти від експертно заданих значень коефіцієнтів до емпірично обґрунтованої шкали відносної небезпеки конфліктів. Адаптація запропонованого підходу до принципів Vision Zero та Sustainable Urban Mobility Planning створює передумови для його практичного застосування в системах управління безпекою дорожнього руху, орієнтованих на пріоритет захисту вразливих учасників та зниження тяжкості наслідків ДТП.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтвердило, що класичні методики оцінки складності та безпеки перехресть, які ґрунтуються виключно на підрахунку конфліктних точок транспортних потоків, не забезпечують повноцінного врахування взаємодій за участю вразливих учасників дорожнього руху та, як наслідок, можуть призводити до недооцінки потенційного рівня небезпеки міських перехресть. Запропонований у роботі узагальнений підхід до формування вагових коефіцієнтів конфліктних точок, що базується на поєднанні характеру транспортної взаємодії та рівня уразливості найбільш незахищеного учасника конфлікту, дозволяє зберегти базову логіку класичної методики та водночас суттєво розширити її аналітичні можливості.

Отримані результати свідчать, що використання універсальної формули розрахунку показника складності перехрестя забезпечує кількісне врахування різноманітних типів конфліктних взаємодій без необхідності введення значної кількості фіксованих емпіричних коефіцієнтів. На прикладі типового міського перехрестя показано, що урахування конфліктів за участю пішоходів і велосипедистів може істотно змінювати кінцеву оцінку складності та потенційної небезпеки, що підтверджує доцільність застосування запропонованого підходу для обґрунтування та пріоритезації заходів з підвищення безпеки дорожнього руху.

Запропонована методика узгоджується з сучасними європейськими принципами забезпечення безпеки дорожнього руху, зокрема концепціями Vision Zero та Sustainable Urban Mobility Planning, і може бути використана на етапах аналізу, проєктування та порівняльної оцінки схем організації дорожнього руху. Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричну калібровку коефіцієнтів уразливості на основі статистики дорожньо-транспортних пригод, даних відеоспостереження та аналізу передаварійних ситуацій, що дозволить підвищити прикладну надійність та точність запропонованого підходу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Статистика дорожньо-транспортних пригод. Патрульна поліція: веб-сайт. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (дата звернення: 31.01.2026)
- 2.M.Salem, R. S., Zero, B. C., Omer, D. H., & Mohammed, G. J. (2025). Improving the Level of Service and Capacity of Shorish Road in Erbil Using HCS7 and HCM2010. *EURASIAN JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING*, 11(1), 24-37. <https://doi.org/10.23918/eajse.v11i1p3>
- 3.Li, J.; Zong, R.; Wang, Y.; Deng, W. Complexity Evaluation for Urban Intersection Scenarios in Autonomous Driving Tests: Method and Validation. *Appl. Sci.* 2024, 14, 10451. <https://doi.org/10.3390/app142210451>
- 4.Kumar V., Hassan T., Raj U., Gaurav A., Kumar N. Evaluation of uncontrolled intersection performance based on microscopic simulation // International Research Journal of Education and Technology. 2023. ISSN 2581-7795. Режим доступу: <https://www.irjweb.com/viewarticle.php?aid=EVALUATION-OF-UNCONTROLLED-INTERSECTION-PERFORMANCE-BASED-ON-MICROSCOPIC-SIMULATION> (дата звернення: 02.02.2026).
- 5.Cheng, Y.; Liu, Z.; Gao, L.; Zhao, Y.; Gao, T. Traffic Risk Environment Impact Analysis and Complexity Assessment of Autonomous Vehicles Based on the Potential Field Method. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 337. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610337>
- 6.Om Prakash Giri, Padma Bahadur Shahi, Janani Selvam, Sandeep Poddar, Amiya Bhaumik. Road traffic regulation and enforcement status: A Nepalese traffic police perspective, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 26, 2024,101188, ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101188>.
- 7.Weinreuter, Hannes & Strelau, Nadine-Rebecca & Qiu, Kevin & Jiang, Yancheng & Deml, Barbara & Heizmann, Michael. (2022). Intersection Complexity and Its Influence on Human Drivers. *IEEE Access*. 10. 74059-74070. 10.1109/ACCESS.2022.3189017.
- 8.Shokrolah Shirazi, Mohammad & Morris, Brendan. (2016). Looking at Intersections: A Survey of Intersection Monitoring, Behavior and Safety Analysis of Recent Studies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. PP. 1-21. 10.1109/TITS.2016.2568920.
- 9.Chenxi Wang, Stefania Zourlidou, Jens Golze & Monika Sester (2021) Trajectory analysis at intersections for traffic rule identification, *Geo-spatial Information Science*, 24:1, 75-84, DOI: 10.1080/10095020.2020.1843374
- 10.Zourlidou, S., Sester, M., & Hu, S. (2023). Recognition of Intersection Traffic Regulations from Crowdsourced Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1), 4. <https://doi.org/10.3390/ijgi12010004>
- 11.Huang, P., Ding, H., Chen, H.: An entropy-based model for quantifying multi-dimensional traffic scenario complexity. *IET Intell. Transp. Syst.* 18, 1289–1305 (2024). <https://doi.org/10.1049/itr2.12510>
- 12.Foomani M., Alecsandru C., Awasthi A. Safety Performance Assessment of Stop-Operated Intersection Equipped with Active Road Sign // *Canadian Transportation Research Forum 50th Annual Conference – Another 50 Years: Where to From Here?* – Montreal, Quebec, Canada, 24–26 May 2015. – 14 p. – URL: http://ctrf.ca/?page_id=3310 (дата звернення: 02.02.2026)
- 13.Yashasvi Rachakonda, Digvijay S. Pawar. Evaluation of intersection conflict warning system at unsignalized intersections: A review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 10, Issue 4, 2023, Pages 530-547, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.04.003>.
- 14.Federal Highway Administration. *Safety Analysis*. FHWA Highway Safety Programs, Local and Rural Road Safety Program. — Washington, DC. <https://highways.dot.gov/safety/local-rural/intersection-safety-manual-local-rural-road-owners/3-safety-analysis>
- 15.Wang, J., Guo, X., & Yang, X. (2021). Efficient and Safe Strategies for Intersection Management: A Review. *Sensors*, 21(9), 3096. <https://doi.org/10.3390/s21093096>
- 16.Jordan P. *Technical knowledge for road safety engineers – intersection safety* [Електронний ресурс] : презентація. — Road Safety International. — Режим доступу: <https://www.carecprogram.org/uploads/10-Intersection-safety.pdf> (дата звернення: 02.02.2026).
- 17.Yang, J., Zhao, K., Li, M., Xu, Z., & Li, Z. (2021). Identifying Complex Junctions in a Road Network. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 4. <https://doi.org/10.3390/ijgi10010004>
- 18.Yang, Shijuan & Gao, Li & Yanan, Zhao & Li, Xurong. (2021). Research on the Quantitative Evaluation of the Traffic Environment Complexity for Unmanned Vehicles in Urban Roads. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2021.3054882.
- 19.Liu, W., Chen, Y., Li, H., & Zhang, H. (2022). Quantitative Study on Road Traffic Environment Complexity under Car-Following Condition. *Sustainability*, 14(10), 6251. <https://doi.org/10.3390/su14106251>
- 20.Wei, Z., Zhou, H., & Zhou, R. (2024). Risk and Complexity Assessment of Autonomous Vehicle Testing Scenarios. *Applied Sciences*, 14(21), 9866. <https://doi.org/10.3390/app14219866>

- 21.О. Б. Потійчук, Л. М. Піліпака ПЗ2 Транспортні розв'язки: навч. посібник. [Електронне видання]. Рівне: НУБГП, 2020. 263 с. ISBN 978-966-327-481-2 https://ep3.nuwm.edu.ua/19648/1/tr_posib_2.pdf
- 22.Кашканов А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху: навчальний посібник. Вінниця, 2016. 125 с.

REFERENCES

- 1.Statystyka dorozhno-transportnykh pryhod. Patrulna politsiia: veb-sait. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (data zvernennia: 31.01.2026)
- 2.M.Salem, R. S., Zero, B. C., Omer, D. H., & Mohammed, G. J. (2025). Improving the Level of Service and Capacity of Shorish Road in Erbil Using HCS7 and HCM2010. EURASIAN JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING, 11(1), 24-37. <https://doi.org/10.23918/eajse.v11i1p3>
- 3.Li, J.; Zong, R.; Wang, Y.; Deng, W. Complexity Evaluation for Urban Intersection Scenarios in Autonomous Driving Tests: Method and Validation. Appl. Sci. 2024, 14, 10451. <https://doi.org/10.3390/app142210451>
- 4.Kumar V., Hassan T., Raj U., Gaurav A., Kumar N. Evaluation of uncontrolled intersection performance based on microscopic simulation // International Research Journal of Education and Technology. 2023. ISSN 2581-7795. Rezhyim dostupu: <https://www.irjweb.com/viewarticle.php?aid=EVALUATION-OF-UNCONTROLLED-INTERSECTION-PERFORMANCE-BASED-ON-MICROSCOPIC-SIMULATION> (data zvernennia: 02.02.2026).
- 5.Cheng, Y.; Liu, Z.; Gao, L.; Zhao, Y.; Gao, T. Traffic Risk Environment Impact Analysis and Complexity Assessment of Autonomous Vehicles Based on the Potential Field Method. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 337. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610337>
- 6.Om Prakash Giri, Padma Bahadur Shahi, Janani Selvam, Sandeep Poddar, Amiya Bhaumik. Road traffic regulation and enforcement status: A Nepalese traffic police perspective, Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Volume 26, 2024,101188, ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101188>.
- 7.Weinreuter, Hannes & Strelau, Nadine-Rebecca & Qiu, Kevin & Jiang, Yancheng & Deml, Barbara & Heizmann, Michael. (2022). Intersection Complexity and Its Influence on Human Drivers. IEEE Access. 10. 74059-74070. 10.1109/ACCESS.2022.3189017.
- 8.Shokrolah Shirazi, Mohammad & Morris, Brendan. (2016). Looking at Intersections: A Survey of Intersection Monitoring, Behavior and Safety Analysis of Recent Studies. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. PP. 1-21. 10.1109/TITS.2016.2568920.
- 9.Chenxi Wang, Stefania Zourlidou, Jens Golze & Monika Sester (2021) Trajectory analysis at intersections for traffic rule identification, Geo-spatial Information Science, 24:1, 75-84, DOI: 10.1080/10095020.2020.1843374
- 10.Zourlidou, S., Sester, M., & Hu, S. (2023). Recognition of Intersection Traffic Regulations from Crowdsourced Data. ISPRS International Journal of Geo-Information, 12(1), 4. <https://doi.org/10.3390/ijgi12010004>
- 11.Huang, P., Ding, H., Chen, H.: An entropy-based model for quantifying multi-dimensional traffic scenario complexity. IET Intell. Transp. Syst. 18, 1289–1305 (2024). <https://doi.org/10.1049/itr2.12510>
- 12.Foomani M., Alecsandru C., Awasthi A. Safety Performance Assessment of Stop-Operated Intersection Equipped with Active Road Sign // Canadian Transportation Research Forum 50th Annual Conference – Another 50 Years: Where to From Here? – Montreal, Quebec, Canada, 24–26 May 2015. – 14 p. – URL: http://ctrf.ca/?page_id=3310 (data zvernennia: 02.02.2026)
- 13.Yashasvi Rachakonda, Digvijay S. Pawar. Evaluation of intersection conflict warning system at unsignalized intersections: A review, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 10, Issue 4, 2023, Pages 530-547, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.04.003>.
- 14.Federal Highway Administration. Safety Analysis. FHWA Highway Safety Programs, Local and Rural Road Safety Program. — Washington, DC. <https://highways.dot.gov/safety/local-rural/intersection-safety-manual-local-rural-road-owners/3-safety-analysis>
- 15.Wang, J., Guo, X., & Yang, X. (2021). Efficient and Safe Strategies for Intersection Management: A Review. Sensors, 21(9), 3096. <https://doi.org/10.3390/s21093096>
- 16.Jordan P. Technical knowledge for road safety engineers – intersection safety [Elektronnyi resurs] : prezentatsiia. — Road Safety International. — Rezhyim dostupu: <https://www.carecprogram.org/uploads/10-Intersection-safety.pdf> (data zvernennia: 02.02.2026).
- 17.Yang, J., Zhao, K., Li, M., Xu, Z., & Li, Z. (2021). Identifying Complex Junctions in a Road Network. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(1), 4. <https://doi.org/10.3390/ijgi10010004>

18. Yang, Shijuan & Gao, Li & Yanan, Zhao & Li, Xurong. (2021). Research on the Quantitative Evaluation of the Traffic Environment Complexity for Unmanned Vehicles in Urban Roads. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2021.3054882.
19. Liu, W., Chen, Y., Li, H., & Zhang, H. (2022). Quantitative Study on Road Traffic Environment Complexity under Car-Following Condition. Sustainability, 14(10), 6251. <https://doi.org/10.3390/su14106251>
20. Wei, Z., Zhou, H., & Zhou, R. (2024). Risk and Complexity Assessment of Autonomous Vehicle Testing Scenarios. Applied Sciences, 14(21), 9866. <https://doi.org/10.3390/app14219866>
21. O. B. Potichuk, L. M. Pilipaka P32 Transportni rozviazky: navch. posibnyk. [Elektronne vydannia]. Rivne: NUVHP, 2020. 263 s. ISBN 978-966-327-481-2 https://ep3.nuwm.edu.ua/19648/1/tr_posib_2.pdf
22. Kashkanov A.A., Kuzhel V.P. Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu: navchalnyi posibnyk. Vinnytsia, 2016. 125 s.

O. Kholodova, M. Buhaiova, O. Kholodov. Critical analysis of methods for assessing the safety of regulated and unregulated intersections, taking into account the complexity of transport interactions

A critical analysis of classical and modern methods for assessing the safety of regulated and unregulated intersections, accounting for the complexity of traffic interactions, has been conducted. It has been shown that approaches based solely on accident statistics or the counting of conflict points have limited capacity to identify potentially dangerous situations and do not sufficiently account for interactions involving vulnerable road users — pedestrians, cyclists, and public transport users.

Based on a synthesis of research, the feasibility of moving from rigidly fixed empirical coefficients to a universal principle for forming weight indicators for conflict points is justified. A generalized approach to determining weighting coefficients for conflict interactions is proposed, combining the nature of transport interaction and the level of vulnerability of the most vulnerable participant in the conflict.

A universal formula for an integral indicator of intersection complexity has been developed, allowing the quantitative consideration of various types of conflict interactions, including those involving pedestrians, cyclists, and urban rail transport, without introducing a large number of separate empirical coefficients. The proposed indicator is interpreted as a measure of the potential danger at an intersection, consistent with the concept of surrogate safety analysis.

A typical urban, unregulated intersection demonstrates that accounting for conflicts involving vulnerable road users can significantly alter the final assessment of complexity and raise the intersection's potential danger category. This confirms the feasibility of the proposed approach for comparative assessment of alternative traffic management schemes and for prioritizing safety improvement measures.

Key words: road safety, intersections, conflict points, traffic interactions, vulnerable road users, integral complexity index, weighting coefficients.

ХОЛОДОВА Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: olgakholodova2807@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-4217-0548>.

БУГАЙОВА Марина Олександрівна, старший викладач кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kazmar2383@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1889-9555>.

ХОЛОДОВ Олег Віталійович, здобувач 3 курсу, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kholodovoleg1408@gmail.com.

Olga KHOLODOVA, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Assoc. Professor of Department of Traffic Management and Road Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: olgakholodova2807@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-4217-0548>.

Maryna BUHAIOVA, senior lecturer of Department of Traffic Management and Road Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kazmar2383@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1889-9555>.

Oleg KHOLODOV, third-year student, faculty of transport systems, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kholodovoleg1408@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-7706-5169>.

Дата надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

<https://doi.org/10.36910/39eh8d59>

Хітров І.О., Клімов С.В.

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна***БОРТОВІ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ЗАСІБ ІНТЕГРАЦІЇ
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ТРАНСПОРТНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ**

Інтенсифікація розвитку транспортних засобів, ускладнення їх конструкції та зростання вимог до безпеки, надійності й ефективності експлуатації зумовлюють необхідність проведення комплексних наукових досліджень у цьому напрямі. Сучасний транспортний засіб дедалі більше перетворюється на складну технічну та інформаційну систему, функціонування якої потребує обґрунтованих рішень щодо інтеграції апаратно-програмних компонентів і алгоритмів управління. У зазначеному контексті досліджено бортові інформаційно-комунікаційні системи (БІКС) транспортних засобів як ключового засобу інтеграції з транспортною інфраструктурою в умовах розвитку інтелектуальних транспортних систем. В статті розкрито сутність, функціональне призначення та роль БІКС у забезпеченні інформаційної взаємодії між транспортними засобами, елементами інфраструктури та системами управління рухом. Розглянуто еволюцію та класифікацію БІКС за рівнем інтеграції, функціональним призначенням і рівнем автоматизації. Визначено основні структурні компоненти сучасних інтегрованих систем та принципи їх функціонування в єдиному інформаційному просторі транспортної системи. З'ясовано, що впровадження БІКС сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху, ефективності експлуатації транспортних засобів, оптимізації процесів технічного обслуговування і ремонту, а також зменшенню негативного впливу транспорту на довкілля. Визначено основні технічні, економічні та організаційні обмеження впровадження таких систем, а також окреслено перспективні напрями їх подальшого розвитку. Доведено, що БІКС є технологічною основою інтеграції транспортних засобів у єдиний інформаційний простір та формування сталих, безпечних і ефективних моделей сучасної мобільності. Це створює передумови для формування єдиного підходу до впровадження інтелектуальних транспортних технологій та забезпечення сталого розвитку транспортної галузі.

Ключові слова: транспортний засіб; бортові інформаційно-комунікаційні системи; транспортна інфраструктура; інтеграція транспортних систем; інтелектуальні транспортні системи.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку транспортної галузі характеризується інтенсивною цифровізацією, зростанням рівня автомобілізації та ускладненням умов функціонування транспортних систем, особливо в міських агломераціях. За таких умов традиційні підходи до організації дорожнього руху та управління транспортною інфраструктурою дедалі частіше виявляються недостатньо ефективними, що зумовлює необхідність впровадження інтелектуальних та інтегрованих рішень [1].

Одним із ключових напрямів трансформації транспортної системи є забезпечення тісної взаємодії між транспортними засобами та транспортною інфраструктурою. У цьому контексті бортові інформаційно-комунікаційні системи (БІКС) відіграють роль базового засобу інтеграції, забезпечуючи обмін даними в режимі реального часу, підтримку прийняття рішень водієм або автоматизованими системами керування, а також адаптацію транспортного засобу до поточних умов руху. Такі системи є технологічною основою реалізації концепцій інтелектуальних транспортних систем, підключеного та автоматизованого транспорту.

Актуальність дослідження бортових інформаційно-комунікаційних систем зумовлена їх зростаючим впливом на рівень безпеки дорожнього руху, ефективність використання транспортної інфраструктури, пропускну здатність вулично-дорожньої мережі та екологічні показники транспорту. Водночас інтеграція транспортного засобу з інфраструктурою потребує системного підходу, що враховує технічні, інформаційні та організаційні аспекти функціонування транспортної системи в цілому.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження в галузі інтелектуальних транспортних систем приділяють значну увагу розвитку інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечують інтеграцію транспортних засобів з дорожньою інфраструктурою.

Наукова праця В. Волкова та співавт. [2] розкриває питання інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів у склад інтелектуальних транспортних систем, доводячи, що комплексне управління технічним станом транспортних засобів є важливим чинником забезпечення надійності, безпеки та ефективності транспортного процесу.

Дослідження Г. Вайганг та К. Комар [3] аналізує БІКС транспортних засобів, оцінює їх функціонування, вразливості та методи забезпечення інформаційної безпеки і надійності.

У свою чергу, М. А. Rehman та співавт. [4] надають огляд технології комплексної взаємодії транспортних засобів, акцентуючи увагу на перевагах інтегрованих систем для оптимізації енергоспоживання, підвищення безпеки руху та забезпечення екологічної стабільності транспортної мережі.

Науковці R. Dhinesh Kumar та A. Rammohan [5] досліджують застосування технології мобільної взаємодії транспортного засобу з усіма об'єктами, підвищенні ефективності транспортних потоків, зменшенні аварійності, координації взаємодії між транспортними засобами та інфраструктурою, описуючи сучасні тенденції, сценарії використання та рекомендації.

У дослідженні J. Contreras-Castillo та співавт. [6] розглянуто архітектуру «інтернету» транспортних засобів, протоколи обміну даними та механізми безпеки, які є критично важливими для надійної та стабільної роботи інтегрованих систем.

Однак, незважаючи на значний обсяг досліджень, у науковій літературі недостатньо уваги приділено комплексній оцінці інтеграції бортових інформаційно-комунікаційних систем з транспортною інфраструктурою, взаємодії їх ключових компонентів та впливу на підвищення ефективності, надійності й безпеки транспортних процесів у рамках інтелектуальних транспортних систем.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є наукове обґрунтування ролі бортових інформаційно-комунікаційних систем як ключового інструменту інтеграції транспортного засобу з транспортною інфраструктурою в умовах розвитку інтелектуальних транспортних систем, а також визначення їх впливу на безпеку, ефективність експлуатації та управління транспортними процесами.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких основних завдань: проаналізувати сучасні підходи до формування та розвитку бортових інформаційно-комунікаційних систем транспортних засобів у контексті інтелектуальних транспортних систем; визначити функціональне призначення та місце БІКС у системі взаємодії транспортного засобу з елементами транспортної інфраструктури; систематизувати та класифікувати бортові інформаційно-комунікаційні системи за рівнем інтеграції, функціональним призначенням і ступенем автоматизації; дослідити структурну архітектуру сучасних інтегрованих БІКС і принципи їх функціонування в єдиному інформаційному просторі транспортної системи; проаналізувати можливості використання БІКС для підвищення безпеки дорожнього руху, ефективності експлуатації та оптимізації процесів технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів; визначити основні технічні, економічні та організаційні обмеження впровадження БІКС і окреслити перспективні напрями їх подальшого розвитку.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Філософський зміст БІКС транспортних засобів полягає у трансформації самого уявлення про транспортний засіб як технічний об'єкт – від ізольованої механічної конструкції до відкритої кіберфізичної системи, інтегрованої в ширший інформаційний і соціальний простір. У цьому сенсі транспортний засіб перестає бути лише засобом переміщення та набуває властивостей активного суб'єкта взаємодії, здатного сприймати, інтерпретувати й передавати інформацію про власний стан і навколишнє середовище.

БІКС виступають посередником між фізичною реальністю руху та абстрактним інформаційним виміром управління, поєднуючи матеріальне й цифрове в єдиному процесі прийняття рішень. Через них реалізується перехід від інтуїтивного, людиноцентричного керування до раціонально організованого, алгоритмізованого управління, де знання формується на основі даних, а дія – на основі прогнозу. Водночас, наука, створюючи достовірні знання, покликана для подолання небезпеки та ризиків, які генеруються людською діяльністю [7].

У ширшому контексті розвитку суспільства БІКС відображають зміну парадигми мобільності – від індивідуальної автономії до колективної узгодженості. Взаємодія транспортних засобів між собою та з інфраструктурою формує нову форму технічної комунікації, у якій безпека, ефективність і сталість руху досягаються не за рахунок ізольованих рішень, а через координацію та взаємну відповідальність елементів транспортної системи [8].

БІКС, виступаючи функціональною ланкою між фізичними транспортними процесами та інформаційними системами управління, у результаті інтеграції інформаційних систем у транспортні засоби перетворюють їх на «комп'ютери на колесах», забезпечуючи узгоджену та ефективну взаємодію, а також підвищення рівня безпеки, автономності й комфорту в умовах розвитку інтелектуальних транспортних систем [9].

БІКС транспортних засобів являють собою сукупність апаратно-програмних засобів, призначених для збирання, оброблення, передавання та відображення інформації, необхідної для забезпечення функціонування транспортного засобу та його взаємодії з зовнішнім середовищем. Вони формують основу цифрової трансформації сучасного транспорту та є ключовим елементом інтелектуальних транспортних систем.

Функціональне призначення БІКС полягає у забезпеченні інформаційної взаємодії транспортного засобу з іншими учасниками дорожнього руху та елементами транспортної інфраструктури, підтримці процесів управління рухом і підвищенні безпеки та ефективності експлуатації, що реалізується через навігаційні, діагностичні, попереджувальні та керуючі функції, спрямовані на оптимізацію режимів руху й зменшення негативного впливу транспорту на довкілля. Зазначені системи виступають технологічною основою реалізації інтелектуальних транспортних систем, забезпечуючи адаптацію транспортного засобу до змінних умов руху та інтеграцію його в єдиний інформаційний простір транспортної системи.

Класифікація БІКС транспортних засобів дозволяє впорядкувати різноманіття існуючих технічних рішень і є необхідною умовою для їх наукового аналізу та практичного впровадження [10]. Залежно від рівня інтеграції такі системи поділяють на локальні, мережеві та інтегровані, де локальні виконують окремі функції без зовнішнього обміну даними, мережеві забезпечують зв'язок із зовнішніми інформаційними системами, а інтегровані поєднують функції збору, оброблення та передавання інформації в межах єдиного інформаційного середовища. За функціональним призначенням БІКС класифікують на інформаційні, діагностичні, керуючі та комунікаційні, що відображає їх роль у забезпеченні безпеки руху, управлінні експлуатацією та технічному стані транспортного засобу. За рівнем автоматизації розрізняють системи інформаційної підтримки водія, системи допомоги водієві та системи з елементами автономного керування. Крім того, класифікація може здійснюватися з урахуванням типу транспортного засобу та умов його експлуатації, що дозволяє адаптувати бортові інформаційно-комунікаційні системи до специфічних вимог автомобільного, вантажного або спеціалізованого транспорту.

Структурно БІКС включають сукупність датчиків і вимірювальних пристроїв, бортових обчислювальних модулів, навігаційних систем, засобів бездротового зв'язку, інтерфейсів взаємодії з водієм, а також програмного забезпечення для оброблення й аналізу даних (табл.). Така архітектура забезпечує збирання інформації про технічний стан транспортного засобу, параметри руху, дорожні умови та зовнішні впливи, а також її подальше використання для підтримки прийняття рішень [11].

Класичні бортові системи сформували початковий етап розвитку бортових інформаційно-комунікаційних рішень і були зосереджені переважно на інформуванні водія та забезпеченні базової безпеки руху. Функціонування цих систем ґрунтується на локальній обробці сигналів без розвинених комунікаційних можливостей і практично не передбачає взаємодії з зовнішнім інформаційним середовищем.

Середній рівень інтеграції, або напівінтелектуальні бортові системи, характеризується переходом від ізольованих функцій до комплексної обробки інформації та часткової автоматизації керування. На цьому етапі з'являються бортові комп'ютери, які об'єднують дані від численних датчиків і надають водієві розширену інформацію про режими руху та експлуатаційні показники. Значного розвитку набувають системи допомоги водієві, що підтримують процес керування шляхом попередження про небезпечні ситуації та адаптації швидкісних режимів. Важливу роль відіграють і супутникові навігаційні системи, які забезпечують орієнтування в просторі та перші елементи зв'язку з зовнішніми диспетчерськими й інформаційними системами.

Сучасні інтегровані та інтелектуальні БІКС є результатом глибокої цифровізації транспорту та розвитку інформаційно-комунікаційних технологій [3]. Вони забезпечують повноцінну інтеграцію транспортного засобу в єдиний інформаційний простір транспортної системи завдяки застосуванню V2X-технологій, телематичних платформ і високопродуктивних обчислювальних модулів. Такі системи поєднують функції безпеки, керування, навігації, зв'язку та інформаційно-розважальних сервісів, а також підтримують різні рівні автономного керування [4]. Окреме значення мають системи моніторингу технічного стану й прогнозного технічного обслуговування, які дозволяють підвищити надійність і ефективність експлуатації транспортних засобів за рахунок аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу.

Таблиця Еволюція бортових інформаційно-комунікаційних систем транспортних засобів

Рівень / тип системи	Орієнтовні роки розвитку	Приклади систем	Основні функції та призначення
Базовий / класичні системи	1950-1980	Бортові прилади (спідометр, тахометр, датчики палива, температури, тиску); антиблокувальна система гальм; система моніторингу тиску в шинах	Надання базової інформації водію; забезпечення безпечного гальмування; контроль технічного стану коліс
Напівінтелектуальні / середній рівень інтеграції	1980-2010	Бортові комп'ютери; системи допомоги водієві (попередження про виїзд зі смуги руху, адаптивний круїз-контроль, система попередження про зіткнення тощо); супутникова навігація	Обробка даних від датчиків; підтримка допомоги водієві; навігація; часткова автоматизація керування
Інтелектуальні / сучасні інтегровані системи	2010-дотепер	складні системи взаємодії БІКС з програмним та хмарними сервісами: зв'язок з усім (V2X-системи), автономне керування, моніторинг стану водія; системи прогностного технічного обслуговування	Реальний час обміну даними з іншими транспортними засобами та інфраструктурою; мультимедійні та комунікаційні сервіси; автономне управління; раннє виявлення несправностей, підвищення безпеки та ефективності

Архітектура сучасних БІКС транспортних засобів формується як багаторівнева структура, що забезпечує безперервний рух інформаційних потоків від фізичних процесів до систем управління. На сенсорному рівні здійснюється збирання первинних даних за допомогою датчиків, камер, радарів та вимірювальних пристроїв, які фіксують параметри руху, технічний стан транспортного засобу та характеристики дорожнього середовища [5]. Рівень бортової обробки даних забезпечує фільтрацію, агрегування та аналіз отриманої інформації з використанням вбудованих обчислювальних модулів і алгоритмів прийняття рішень у режимі реального часу. Комунікаційний рівень реалізує обмін даними між транспортним засобом, іншими учасниками руху та інфраструктурою за допомогою технологій V2V, V2I та V2C, формуючи єдиний інформаційний простір транспортної системи. Рівень зовнішніх інформаційних систем об'єднує диспетчерські центри, сервісні платформи та системи управління транспортними потоками, які використовують отримані дані для аналізу, прогнозування та оптимізації експлуатації, технічного обслуговування й розвитку транспортної інфраструктури [6].

Прикладом застосування сучасних БІКС є функціонування підключеного та частково автономного транспортного засобу в умовах міської транспортної мережі. У такому транспортному засобі бортова система інтегрує дані від навігаційних супутникових систем, камер, радарів і датчиків технічного стану, а також інформацію, що надходить від елементів дорожньої інфраструктури та інших учасників руху за технологією V2X (рис.).

У режимі реального часу БІКС отримує від інфраструктури дані про сигнали світлофорів, дорожні обмеження, дорожні роботи та рівень завантаженості вулично-дорожньої мережі. На основі цієї інформації система автоматично коригує маршрут руху, швидкісний режим і режими роботи допоміжних систем, що сприяє зменшенню часу поїздки, витрат палива та шкідливих викидів. Водій при цьому отримує зрозумілі візуальні та звукові повідомлення або, у разі підвищеного рівня автоматизації, бере участь у керуванні лише в критичних ситуаціях. Одночасно БІКС здійснює постійний моніторинг технічного стану транспортного засобу, аналізуючи параметри роботи силової установки, гальмівної системи та елементів ходової частини. За результатами аналізу формується прогноз технічного обслуговування, а відповідна інформація передається до сервісних центрів або диспетчерських систем.



Рисунок – Взаємодія БІКС підключеного транспортного засобу з елементами міської транспортної інфраструктури (V2X)

Взаємодія сучасних інтегрованих та інтелектуальних БІКС транспортного засобу в контексті експлуатації, технічного обслуговування та ремонту має комплексний характер і охоплює всі етапи життєвого циклу транспортного засобу. Такі системи забезпечують безперервний інформаційний зв'язок між транспортним засобом, сервісною інфраструктурою та системами управління експлуатацією.

У процесі експлуатації БІКС здійснюють постійний моніторинг параметрів руху, технічного стану основних агрегатів і умов навколишнього середовища. На основі даних від датчиків та зовнішніх інформаційних джерел система адаптує режими роботи транспортного засобу, формує попередження про потенційно небезпечні ситуації та підтримує оптимальні режими експлуатації. Одночасно інформація про фактичні режими роботи накопичується та передається до централізованих інформаційних систем для аналізу ефективності використання транспортного засобу та прийняття управлінських рішень.

У сфері технічного обслуговування інтелектуальні БІКС виконують функції діагностування та прогнозування технічного стану. Система аналізує динаміку зміни контрольованих параметрів, виявляє відхилення від нормативних значень і визначає ознаки зародження несправностей. На основі алгоритмів прогнозувальної аналітики формується рекомендація щодо строків і обсягу технічного обслуговування, що дозволяє перейти від регламентного до станоморієнтованого та передбачуваного обслуговування. Відповідна інформація автоматично передається до сервісних підприємств, що підвищує готовність ремонтної інфраструктури [2].

У процесі ремонту БІКС забезпечують інформаційну підтримку діагностичних і відновлювальних робіт. Накопичені дані про експлуатаційні режими та історію відмов використовуються для уточнення причин несправностей і вибору оптимальних методів ремонту. Система може формувати електронні діагностичні звіти, коди помилок і рекомендації щодо заміни або відновлення вузлів і агрегатів, що скорочує тривалість ремонту та зменшує імовірність повторних відмов. Після завершення ремонтних робіт БІКС фіксують результати втручання, оновлюючи цифрову історію технічного стану транспортного засобу.

Оцінювання ефективності впровадження БІКС є важливим етапом обґрунтування доцільності їх використання в сучасних системах і має базуватися на сукупності кількісних та якісних показників не лише на окремий транспортний засіб, а й на функціонування транспортної системи загалом, з урахуванням безпеки, економічної ефективності та якості експлуатації.

Одним із ключових показників ефективності є рівень зниження аварійності, який безпосередньо пов'язаний із функціонуванням систем допомоги водієві, попередження про небезпечні ситуації та взаємодії транспортного засобу з інфраструктурою. Використання БІКС забезпечує своєчасне інформування водія або автоматизованих систем керування про потенційні

загрози, що сприяє зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод та тяжкості їх наслідків. У цьому контексті ефективність може оцінюватися шляхом порівняння статистичних показників аварійності до і після впровадження відповідних систем.

Важливим економічним критерієм є скорочення витрат на технічне обслуговування і ремонт транспортних засобів. Завдяки функціям постійного моніторингу та прогнозування технічного стану БІКС дозволяють своєчасно виявляти ознаки зношування або відмов, що дає змогу переходити до станорієнтованого та передбачуваного технічного обслуговування [12]. Це знижує імовірність раптових відмов, скорочує обсяг позапланових ремонтів і оптимізує використання матеріальних та трудових ресурсів сервісних підприємств.

Ще одним важливим показником є підвищення пропускної здатності транспортної мережі, яке досягається за рахунок інтеграції транспортних засобів у єдиний інформаційний простір. Обмін даними між БІКС та елементами транспортної інфраструктури дозволяє оптимізувати маршрути руху, адаптувати швидкісні режими та зменшувати затримки, пов'язані з перевантаженням окремих ділянок вулично-дорожньої мережі. У результаті забезпечується більш рівномірний розподіл транспортних потоків і підвищується загальна ефективність функціонування транспортної системи.

Окрему увагу слід приділити зменшенню часу простою транспортних засобів, який є важливим показником експлуатаційної готовності. Завдяки автоматизованому діагностуванню, плануванню технічного обслуговування та оперативному обміну інформацією з сервісними структурами БІКС сприяють скороченню часу перебування транспортного засобу в неробочому стані. Це особливо актуально для вантажного та громадського транспорту, де простій безпосередньо впливає на економічні показники діяльності перевізників і якість транспортного обслуговування.

Впровадження сучасних БІКС супроводжується низкою технічних обмежень, пов'язаних насамперед із питаннями сумісності та надійності. Різноманіття виробників транспортних засобів, електронних компонентів і програмного забезпечення ускладнює інтеграцію окремих систем у єдине інформаційне середовище. Відсутність уніфікованих стандартів або їх часткова реалізація може призводити до обмеженої взаємодії між бортовими системами та інфраструктурою. Крім того, надійність каналів зв'язку, особливо в умовах високої щільності руху або складних метеорологічних умов, залишається критичним фактором, що безпосередньо впливає на стабільність функціонування БІКС.

Окрему групу проблем становлять питання кібербезпеки та захисту даних. Оскільки БІКС здійснюють постійний обмін великими обсягами даних із зовнішніми інформаційними системами, вони потенційно стають об'єктом кіберзагроз [3]. Несанкціонований доступ до бортових систем може призвести не лише до втрати або спотворення інформації, а й до порушення процесів керування транспортним засобом, що створює загрозу безпеці дорожнього руху.

Суттєвим стримувальним чинником є висока вартість впровадження та експлуатації БІКС. Витрати пов'язані не лише з придбанням апаратних компонентів і розробленням програмного забезпечення, а й з інтеграцією систем у наявну транспортну та сервісну інфраструктуру. Додаткові фінансові ресурси необхідні для обслуговування, оновлення та модернізації БІКС протягом усього життєвого циклу транспортного засобу. Для транспортних підприємств це потребує ретельного економічного обґрунтування та оцінювання окупності інвестицій.

Важливими є також кадрові та організаційні аспекти впровадження. Ефективне використання інтелектуальних бортових систем вимагає наявності фахівців із міждисциплінарними компетенціями у сферах транспорту, інформаційних технологій та систем управління. Недостатній рівень підготовки персоналу може суттєво знизити ефективність застосування БІКС і обмежити реалізацію їх потенціалу. Крім того, впровадження таких систем часто потребує перегляду організаційних процесів експлуатації, технічного обслуговування та управління транспортом, що може супроводжуватися додатковими складнощами на етапі адаптації.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати дозволяють стверджувати, що бортові інформаційно-комунікаційні системи транспортних засобів слід розглядати не лише як окремі технічні рішення, а як системоутворювальний елемент сучасних інтелектуальних транспортних систем. На відміну від традиційних підходів, у яких транспортний засіб функціонує переважно автономно, впровадження БІКС формує принципово нову модель взаємодії, засновану на безперервному обміні даними між транспортним засобом, інфраструктурою та системами управління рухом.

Аналіз функціональних і структурних характеристик БІКС свідчить, що їх ефективність визначається не стільки рівнем окремих технічних компонентів, скільки ступенем інтеграції у єдиний

інформаційний простір транспортної системи. У цьому контексті результати дослідження підтверджують положення, висловлені у працях [3-6], щодо ключової ролі V2X-взаємодії як базової умови підвищення безпеки та ефективності руху. Водночас у даній роботі наголошено на комплексному характері впливу БІКС, який охоплює не лише процеси руху, а й експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт транспортних засобів.

Особливого значення набуває виявлений зв'язок між використанням БІКС і переходом до станоорієнтованих та прогнозних моделей технічного обслуговування. Результати дослідження свідчать, що інтеграція діагностичних і комунікаційних функцій у складі БІКС створює передумови для зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності транспортних засобів, що узгоджується з висновками [2]. При цьому БІКС виступають інформаційною основою формування цифрової історії транспортного засобу, яка може бути використана для прийняття управлінських рішень на рівні транспортних підприємств і органів управління транспортною інфраструктурою.

Проведене дослідження також дозволяє уточнити роль БІКС у підвищенні ефективності функціонування транспортної мережі загалом. Обмін інформацією в режимі реального часу між транспортними засобами та інфраструктурою сприяє оптимізації транспортних потоків, зменшенню затримок і більш раціональному використанню пропускної здатності вулично-дорожньої мережі. У цьому аспекті БІКС доцільно розглядати як інструмент не лише індивідуальної, а й колективної оптимізації руху, що відповідає сучасним концепціям сталої та розумної міської мобільності.

Разом з тим результати дослідження вказують на наявність низки обмежень, які можуть стримувати практичне впровадження БІКС. Зокрема, проблеми стандартизації, сумісності та кібербезпеки залишаються критичними чинниками, що потребують системного вирішення. Це підтверджує доцільність подальших досліджень у напрямі розроблення уніфікованих архітектурних підходів і механізмів захисту інформації, а також методів оцінювання ризиків у середовищі підключеного та автономного транспорту.

ВИСНОВКИ

1. Філософський зміст БІКС полягає в утвердженні ідеї транспорту як інтелектуально організованого середовища, де технологія стає не лише інструментом, а й умовою гармонійної взаємодії людини, машини та простору.

2. БІКС транспортних засобів є універсальним засобом інтеграції фізичних транспортних процесів з інформаційними системами управління, забезпечуючи комплексне підвищення безпеки, ефективності та якості функціонування сучасних транспортних систем.

3. Інтегровані та інтелектуальні БІКС виступають центральним елементом інформаційної взаємодії в процесах експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, забезпечуючи підвищення надійності, експлуатаційної готовності та економічної ефективності використання транспортних засобів, підвищують безпеку та ефективність руху, а також формують технологічну основу для розвитку інтелектуальних транспортних систем і розумної міської мобільності.

4. Оцінювання ефективності впровадження БІКС має здійснюватися на основі системи взаємопов'язаних показників, що відображають безпекові, економічні та експлуатаційні аспекти. Такий підхід дозволяє обґрунтовано визначити практичну доцільність використання БІКС та їх роль у розвитку інтелектуальних транспортних систем.

5. Проблеми та обмеження впровадження БІКС мають комплексний характер і охоплюють технічні, інформаційні, економічні та організаційні аспекти. Їх урахування є необхідною умовою формування ефективної стратегії розвитку інтелектуальних транспортних систем і забезпечення сталого функціонування сучасного транспорту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. United Nations Economic Commission for Europe. Intelligent Transport Systems for sustainable mobility. Geneva : UNECE, 2023. URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-06/ITS%20for%20sustainable%20Mobility_E_pdf_web.pdf.
2. Волков В., Волкова Т., Кужель В., Верхломчук В., Нікіфоров Н. Основи інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів в інтелектуальні транспортні системи. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Вип. 10(2). С. 21-30. <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.21>.
3. Weigang G., Komar K. Analysis of the security of on-board information systems in vehicles. *Transport technologies*. 2023. Vol. 4(1). p. 62-72. <https://doi.org/10.23939/tt2023.01.062>.
4. Rehman M. A., Numan M., Tahir H., Rahman U., Khan M. W., Iftikhar M. Z. A comprehensive overview of vehicle to everything (V2X) technology for sustainable EV adoption. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 74. Part A. 109304. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109304>.

5. Dhinesh Kumar R., Rammohan A. Revolutionizing Intelligent Transportation Systems with Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) technology: Current trends, use cases, emerging technologies, standardization bodies, industry analytics and future directions. *Vehicular Communications*. 2023. Vol. 43. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100638>.
6. Contreras-Castillo J., Zeadally S., Guerrero-Ibañez J. Internet of vehicles: architecture, protocols, and security. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 5, Issue 5, 2017, pp. 3701 - 3709. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2690902>.
7. Броннікова Л. В. Філософські аспекти трансформаційних процесів у сучасній науці. *Актуальні проблеми філософії та соціології*. 2021. Вип. 33. С. 13-17. <https://doi.org/10.32837/apfs.v0i33.1063>.
8. Клімов, С. В., Никончук, В. М., Хітров, І. О. Застосування технологій штучного інтелекту в інформаційних системах на автомобільному транспорті. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2024. 1(105). с. 297-316. <http://ep3.nuwm.edu.ua/31599/1/Vt10523.pdf>.
9. Кашканов А. А., Кужель В. П., Грісюк О. Г. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2010. 230 с. URL: https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/IKCAT/Lec_Lab_IKS_AT_2010.pdf.
10. Кашканов В. А., Кашканов А. А., Кужель В. П. Інформаційні системи і технології на автомобільному транспорті : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2020. 104 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Kashkanov_2020_104.pdf.
11. Кір'янов О. Ф., Мороз М. М., Загорянський В. Г., Кузев І. О. Інформаційні системи і технології в транспортній логістиці: навч. посіб. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. 427 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/275_1446.pdf.
12. Хітров І. О. Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький*. 2024. С. 214-222. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8\(39\)_II/27.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8(39)_II/27.pdf).

REFERENCES

1. Intelligent Transport Systems for sustainable mobility, [online]. Available at: https://unece.org/sites/default/files/2024-06/ITS%20for%20sustainable%20Mobility_E_pdf_web.pdf.
2. Volkov, V., Volkova, T., Kuzhel, V., Verkhloenchuk, V., & Nikiforov, N. (2024). Basics of integration of vehicle technical operation system into intelligent transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 21-30. Available at: <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.21> (in Ukrainian).
3. Weigang, G. & Komar, K. (2023). Analysis of the security of on-board information systems in vehicles. *Transport technologies*, Vol. 4(1). p. 62-72. Available at: <https://doi.org/10.23939/tt2023.01.062> (in Ukrainian).
4. Rehman, M. A., Numan, M., Tahir, H., Rahman, U., Khan, M. W. & Iftikhar, M. Z. (2023). A comprehensive overview of vehicle to everything (V2X) technology for sustainable EV adoption. *Journal of Energy Storage*, Vol. 74. Part A. 109304. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109304>.
5. Dhinesh Kumar, R. & Rammohan, A. (2023). Revolutionizing Intelligent Transportation Systems with Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) technology: Current trends, use cases, emerging technologies, standardization bodies, industry analytics and future directions. *Vehicular Communications*, Vol. 43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100638>.
6. Contreras-Castillo, J., Zeadally, S. & Guerrero-Ibañez, J. (2017). Internet of vehicles: architecture, protocols, and security. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, Issue 5, 2017, pp. 3701 - 3709. Available at: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2690902>.
7. Bronnikova, L. V. (2021). Philosophical aspects of transformation processes in modern science. *Current Problems of Philosophy and Sociology*, Vol. 33. Pp. 13-17. Available at: <https://doi.org/10.32837/apfs.v0i33.1063> (in Ukrainian).
8. Klimov, S., Nykonchuk, V. & Khitrov, I. (2024). Application of artificial intelligence technologies in information systems for road transport. *Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering*, Vol. 1(105). Pp. 297-316. Available at: <http://ep3.nuwm.edu.ua/31599/1/Vt10523.pdf> (in Ukrainian).
9. Kashkanov, A., Kuzhel, V. & Hrysiuk, O. Informatsiini kompiuterni systemy avtomobilnoho transport [Road transport information computer systems]. Vinnytsia : VNTU, 2010. 230 p. Available at: https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/IKCAT/Lec_Lab_IKS_AT_2010.pdf (in Ukrainian).
10. Kashkanov, V., Kashkanov, A. & Kuzhel, V. Informatsiini systemy i tekhnolohii na avtomobilnomu transporti [Information systems and technologies in road transport]. Vinnytsia : VNTU, 2020. 104 p. Available at: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Kashkanov_2020_104.pdf (in Ukrainian).

11. Kirianov, O., Moroz, M., Zahorianskyi, V. & Kuziev, I. Informatsiini systemy i tekhnolohii v transportnii lohistytsi [Information systems and technologies in transport logistics]. Kremenchuk: Kremenchutskyi natsionalnyi universytet imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2022. 427 p. Available at: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/275_1446.pdf (in Ukrainian).

12. Khitrov, I. (2023). Study of the influence of structural reliability and safety of the vehicle for transportation and adaptability to maintenance. Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences, Vol. 8(39), Part II, Pp. 214-222. Available at: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.214-222](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.214-222) (in Ukrainian).

I. Khitrov, Klimov S. On-board information and communication systems as a means of integrating vehicles with transport infrastructure

The intensification of vehicle development, the increasing complexity of their design, and the growing requirements for safety, reliability, and operational efficiency necessitate comprehensive scientific research in this field. A modern vehicle is increasingly transforming into a complex technical and information system, the functioning of which requires well-founded decisions regarding the integration of hardware–software components and control algorithms.

In this context, on-board information and communication systems (OICS) of vehicles are investigated as a key means of integration with transport infrastructure under the conditions of intelligent transportation systems development. The article reveals the essence, functional purpose, and role of OICS in ensuring information interaction between vehicles, infrastructure elements, and traffic management systems. The evolution and classification of OICS according to the level of integration, functional purpose, and degree of automation are considered. The main structural components of modern integrated systems and the principles of their operation within a unified information space of the transport system are identified. It is established that the implementation of OICS contributes to improving road traffic safety, enhancing the operational efficiency of vehicles, optimizing maintenance and repair processes, and reducing the negative environmental impact of transport. The main technical, economic, and organizational constraints on the implementation of such systems are identified, and prospective directions for their further development are outlined. It is proven that OICS constitute the technological basis for integrating vehicles into a unified information space and for forming sustainable, safe, and efficient models of modern mobility. This creates prerequisites for the development of a unified approach to the implementation of intelligent transport technologies and for ensuring the sustainable development of the transport sector.

Key words: vehicle; onboard information and communication systems; transport infrastructure; integration of transport systems; intelligent transportation systems.

ХИТРОВ Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>.

КЛИМОВ Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: s.v.klimov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5993-847X>.

Ihor KHITROV, PhD, Associate Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>.

Serhii KLIMOV, PhD, Associate Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: s.v.klimov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5993-847X>.

Дата надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.03.2026

<https://doi.org/10.36910/vjnvvhg60>

Цюман М.П., Садовник І.І.
Національний транспортний університет

ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ РАЦІОНАЛЬНИМ ВИБОРОМ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ

У статті на основі рівнянь потужнісного балансу з використанням результатів експериментальних досліджень розроблено математичну модель гібридного автомобіля Toyota Prius II, яка дозволяє визначити показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху.

Розроблено алгоритм вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов, дозволяє реалізувати конкретну стратегію управління та впливає на його показники енергоефективності та екологічної безпеки.

Для оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки запропоновано коефіцієнти максимальної ємності та потужності тягової батареї, а також граничну швидкість переходу у гібридний режим. Залежно від цих параметрів виконано математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

За результатами моделювання встановлено, що з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умови наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. Це дозволяє досягти зменшення витрати палива гібридного автомобіля порівняно з традиційним автомобілем з ДВЗ до 42 %, викидів CO до 29 %, C_mH_n до 52 %, CO_2 до 46% при зростанні викидів NO_x до 33 %.

Ключові слова: потужнісний баланс, гібридний автомобіль, енергоефективність, екологічна безпека, параметри управління, тягова батарея, гібридний режим, їздовий цикл.

ВСТУП

Найбільш поширеними енергоустановками на автомобільному транспорті сьогодні є установки на базі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Внаслідок цього, такі автомобілі є потужними споживачами рідких та газоподібних палив та забруднювачами довкілля продуктами їхнього згоряння. Загальна енергоефективність та екологічність автомобіля залежить від досконалості робочих процесів, виду та походження палива, параметрів управління, умов експлуатації, технічного стану, тощо.

До сучасних автомобілів застосовують все більш жорсткі вимоги щодо викидів забруднюючих речовин, зокрема, діоксиду вуглецю CO_2 . Знаною мірою ці викиди залежать від паливної економічності. Одним із напрямів підвищення паливної економічності автомобілів є зближення найбільш енергоефективних режимів роботи ДВЗ та режимів руху автомобіля, зокрема з використанням гібридної електричної енергоустановки та трансмісії.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом дослідженню питань, пов'язаних з показниками паливної ефективності та екологічності гібридних електричних транспортних засобів, присвячено численні наукові публікації [1-9]. Переважно дослідження направлені на: удосконалення алгоритмів управління тяговим асинхронним двигуном м'якого гібридного автомобіля шляхом збільшення ефективності рекуперативного гальмування для покращення економічних та екологічних параметрів [1]; дослідження динаміки параметрів елементів гібридного автомобіля з послідовно-паралельним приводом за допомогою імітаційного моделювання у середовищі Matlab / Simulink [2]; підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання ДВЗ та електричних двигунів [3]; дослідження методів оцінювання показників якості електричних та гібридних автомобілів на етапі експлуатації залежно від середньої швидкості руху автомобіля [4]; дослідження в міських умовах економічних характеристик переобладнаного гібридного автомобіля [5]; математичне моделювання показників паливної економічності та рівня викидів CO_2 в умовах неусталеного руху звичайного комерційного автомобіля та спроектованого на його базі гібридного автомобіля [6]; питання оптимального керування компонентами приводу гібридного автомобіля [7]; дослідження нової гібридної енергетичної установки на основі лінійного вільнопоршневого двигуна

[8]; нові технології Toyota по удосконалення гібридних автомобілів Toyota Prius для збільшення їхньої ефективності та зниження викидів CO₂ [9].

Аналіз результатів вказаних досліджень свідчить про значний інтерес дослідників та розробників автомобілів до технологій гібридного енергозабезпечення транспорту. Однак, питання оптимального проектування та ефективної експлуатації гібридних автомобілів з точки зору енергоефективності, надійності, вартості та екологічності не є до кінця вирішеними, що спонукає до проведення подальших наукових досліджень.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки гібридного автомобіля раціональним вибором його параметрів управління відповідно до умов руху.

Для досягнення мети вирішують наступні завдання:

- розроблення математичної моделі гібридного автомобіля, яка дозволить визначати показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху;
- розроблення алгоритму вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов;
- визначення параметрів, що дозволять виконати оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки;
- математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математичне моделювання руху гібридного автомобіля базується на відомому рівнянні потужнісного балансу автомобіля у даний момент часу [10]:

$$N = N_{\psi} + N_W + N_j = \left(M_a g \psi + C_x \frac{p_0}{R_{\text{нов}} T_0} F_a \frac{V_a^2}{2} + M_a \delta_{ob} j_a \right) \cdot V_a \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де N – потужність на ведучих колесах, кВт; N_{ψ} – потужність дорожнього опору, кВт; N_W – потужність опору повітря, кВт; N_j – потужність опору інерції, кВт; M_a – поточна маса автомобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ψ – коефіцієнт дорожнього опору; C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; p_0 – атмосферний тиск, Па; T_0 – температура навколишнього повітря, К; $R_{\text{нов}}$ – газова стала повітря, Дж/(кг·К); F_a – площа фронтального перерізу автомобіля, м²; V_a – швидкість автомобіля, м/с; δ_{ob} – коефіцієнт обертових мас автомобіля; j_a – прискорення автомобіля, м/с².

Потужність на ведучих колесах автомобіля формується відповідно до роботи наявних джерел енергії. З урахуванням відомих схем гібридних автомобільних енергетичних установок, у загальному випадку модель енергетичних та масових потоків у гібридному автомобілі можна представити у вигляді схеми (рис. 1).

На рис. 1 і далі в тексті використано наступні позначення: r_w – радіус кочення колеса, м; $I_K, I_{\partial}, I_{MG1}, I_{MG2}$ – момент інерції колеса, двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), MG1, MG2, кг·м²; $M, M_e, M_{MG1}, M_{MG2}, M_{MG2}^{\max}$ – крутний момент на ведучих колесах (вихідному валі енергоустановки), ДВЗ, MG1, поточний та максимальний крутний момент MG2, Н·м; $n, n_{\partial}, n_{MG1}, n_{MG2}, n_{MG1}^{\max}$ – частота обертання ведучих коліс (вихідного вала енергоустановки), колінчастого вала ДВЗ, MG1, MG2, максимальна частота обертання вала MG1, хв⁻¹; $U_{mp}, U_{MG1}, U_0, U_{MG}$ – передаточні відношення гібридної трансмісії від двигуна, MG1, MG2, між MG1 та MG2; $\eta_{zmp}, \eta_{mp}, \eta_{MG1}, \eta_{MG2}, \eta_e$ – коефіцієнти корисної дії гібридної трансмісії, механічної частини трансмісії, MG1, MG2, ДВЗ; $k_{N_{\partial to MG}}$ – коефіцієнт розподілу потужності ДВЗ між електричними елементами та передачею на ведучі колеса; $N_e, N_{MG1}, N_{MG2}, N_{MG2}^{\max}, N_{BAT}, N_{BAT}^{ch}, N_{BAT}^{\max}$ – ефективна потужність ДВЗ, MG1, поточна та максимальна потужність MG2, потужність розряджання, заряджання та максимальна потужність батареї, кВт; S_{ch}, S_{ch}^{trg} – поточний та цільовий рівень заряду батареї, %; δ_{BAT}^{ch} – коефіцієнт потужності

заряджання батареї; m_{BAT} – маса батареї, кг; $\rho_{Q_{BAT}}$ – питома ємність батареї, кВт·год/кг; $k_{Q_{BAT}}, k_{N_{BAT}}$ – коефіцієнти максимальної ємності та потужності батареї; Q_{BAT}, Q_{BAT}^{max} – поточна та максимальна ємність батареї, кВт·год; i_{ψ} – число циліндрів ДВЗ; D, S – діаметр циліндра та хід поршня ДВЗ, м; η_v – коефіцієнт наповнення циліндрів ДВЗ; α – коефіцієнт надміру повітря ДВЗ; g_e – питома ефективна витрата палива ДВЗ г/(кВт·год); $G_{нов}, G_{нал}, G_{ВГ}, G_{CO}, G_{C_mH_n}, G_{NO_x}, G_{CO_2}$ – годинні витрати повітря, палива, ВГ та викиди CO, C_mH_n, NO_x, CO_2 , кг/год; l_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння палива, кг повітря/кг палива; g_C, g_H, g_O – масові частки у паливі вуглецю, водню, кисню; h_n – нижча теплота згоряння палива, Дж/кг; $k_{нал}$ – відношення кількості водню до кількості CO у ВГ; m_H – маса каталітичного нейтралізатора, кг; C_H – теплоємність матеріалу каталітичного нейтралізатора, кДж/(кг·К); $T_{ВГ}$ – температура ВГ, К; $\mu_{C_{vмПЗ}}$ – середня ізохорна мольна теплоємність продуктів згоряння, кДж/(кмоль·К); $\mu_{ПЗ}$ – мольна маса продуктів згоряння, кг/кмоль; $k_{ПЗ}$ – показник адиабати продуктів згоряння; T_H – температура каталітичного нейтралізатора, К; $C_{CO}, C_{C_mH_n}, C_{NO_x}, C_{CO_2}$ – концентрації у ВГ CO, C_mH_n, NO_x, CO_2 , %, млн⁻¹; $E_{CO}, E_{C_mH_n}, E_{NO_x}$ – ефективність нейтралізації CO, C_mH_n, NO_x .

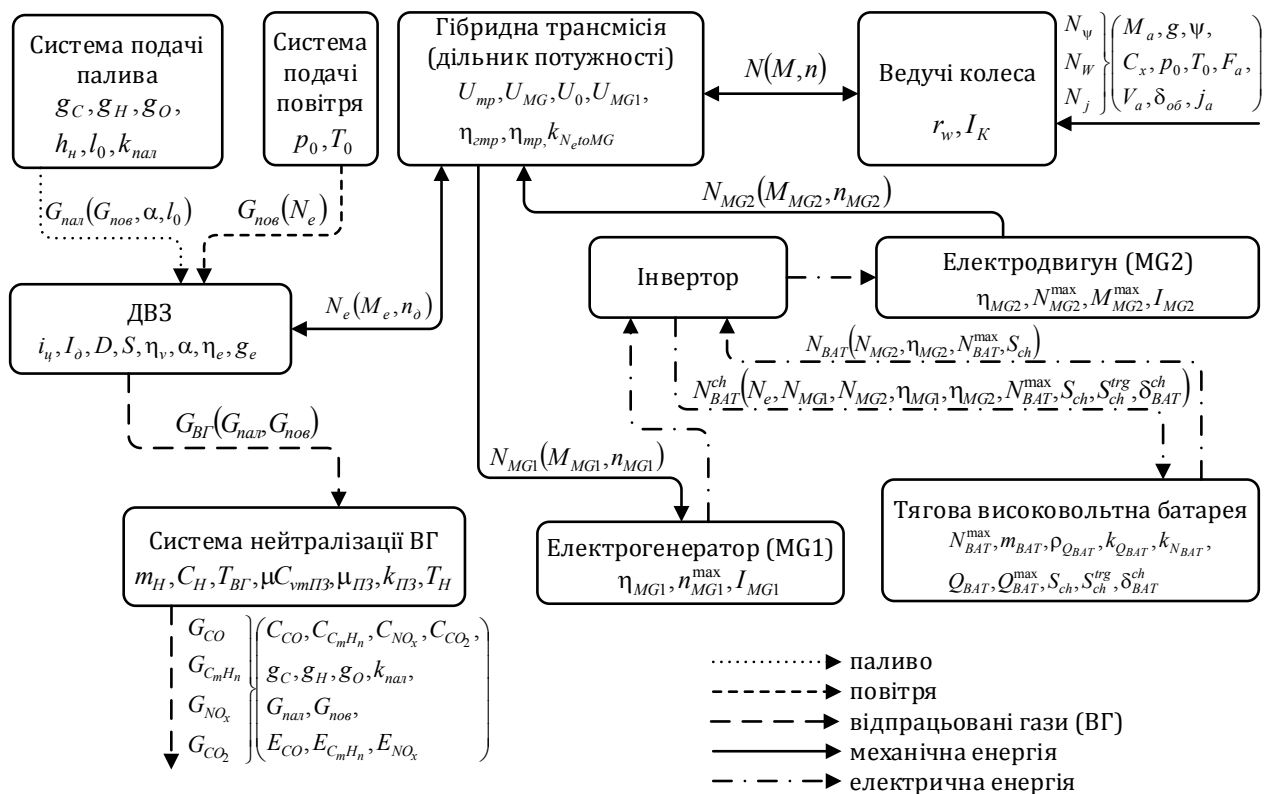


Рисунок 1 – Модель енергетичних та масових потоків у гібридному автомобілі

Як видно зі схеми, потужність на ведучих колесах (вихідному валі енергоустановки), яка є функцією крутного моменту і частоти обертання, об'єднує потужності елементів енергоустановки, кВт:

$$N = f(M, n) = N_e + N_{MG1} + N_{MG2}. \quad (2)$$

Використання тих чи інших елементів гібридної енергоустановки для забезпечення руху визначається системою управління відповідно до швидкісного та навантажувального режиму руху транспортного засобу, рівня заряду батареї, вибраного водієм режиму роботи енергоустановки тощо. Залежно від конкретних умов може бути реалізовано наступні режими роботи:

- режим заряджання на зупинці (автомобіль не рухається, ДВЗ працює та передає механічну енергію до MG1 в режимі електрогенератора, який перетворює отриману енергію в електричну та через інвертор заряджає тягову високовольтну батарею);
- режим рекуперативного гальмування (автомобіль рухається зі сповільненням, отримана механічна енергія від ведучих коліс передається до MG2 в режимі електрогенератора, який перетворює отриману енергію в електричну та через інвертор заряджає тягову високовольтну батарею; ДВЗ вимкнено або у разі високої швидкості чи необхідності застосування додаткового гальмівного моменту ДВЗ може продовжувати працювати в режимі примусового прокручування, споживаючи частину механічної енергії, для захисту MG1 від надмірної швидкості обертання);
- електричний режим із заряджанням у русі (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які не перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї, а високовольтна батарея має рівень заряду нижче цільового; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється MG2, який працює в режимі електродвигуна, споживаючи електричну енергію від батареї; ДВЗ працює та виробляє механічну енергію для приводу MG1, який працює в режимі електрогенератора та виробляє електричну енергію, заряджаючи високовольтну батарею; при цьому, потужність ДВЗ має забезпечити потужність заряджання батареї вищу, ніж потужність розряджання);
- електричний режим (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які не перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї, а високовольтна батарея має рівень заряду вище цільового; ДВЗ вимкнено, а механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється MG2, який працює в режимі електродвигуна, споживаючи електричну енергію від батареї);
- гібридний режим (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється ДВЗ, який виробляє механічну енергію та підводить її до дільника потужності гібридної трансмісії; частина механічної енергії споживається MG1, який працює у режимі електрогенератора, підтримуючи частоту обертання, необхідну для формування визначеного у даному режимі руху передаточного відношення трансмісії, та передає вироблену електричну енергію через інвертор для живлення MG2, що працює у режимі електродвигуна; інша частина механічної енергії ДВЗ після дільника потужності (неспожита MG1) та механічна енергія, вироблена MG2, підводяться до ведучих коліс автомобіля; електрична енергія не підводиться та не споживається високовольтною батареєю);
- режим повного навантаження (автомобіль рухається з повністю натиснутою водієм педаллю акселератора; рівень заряду високовольтної батареї не нижче мінімально допустимого; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється ДВЗ, який працює у номінальному режимі, виробляє механічну енергію та підводить її до дільника потужності гібридної трансмісії; частина механічної енергії споживається MG1, який працює у режимі електрогенератора, підтримуючи частоту обертання, необхідну для формування передаточного відношення трансмісії, що забезпечує отримання номінальної частоти обертання колінчастого вала ДВЗ, та передає вироблену електричну енергію через інвертор для живлення MG2, що працює у режимі електродвигуна, споживаючи також електричну енергію від високовольтної батареї; інша частина механічної енергії ДВЗ після дільника потужності (неспожита MG1) та механічна енергія, вироблена MG2, підводяться до ведучих коліс автомобіля).

Вибір режиму роботи здійснюється системою управління гібридної енергоустановки за алгоритмом (рис. 2).

Представлений алгоритм базується на низці умов, виконання чи невиконання яких призводить до вибору відповідного режиму роботи. Вказані умови порівнюють: значення поточної швидкості автомобіля з нульовим значенням (умова зупинки), з мінімальною швидкістю руху у гібридному режимі $V_a^{\min \text{ ДВЗ}}$, з максимальною швидкістю руху в електричному режимі $V_a^{\max \text{ EV}}$; значення прискорення відносно нульового значення (умови прискорення або сповільнення); значення ступеня натискання на педаль акселератора ϕ_a з максимальним натисканням (умова повного навантаження); значення поточного рівня заряду високовольтної батареї із цільовим (умова необхідності заряджання), мінімальним $S_{ch}^{\min}$ та максимальним $S_{ch}^{\max}$ рівнем заряду; значення частоти обертання вала MG1 із максимально допустимим значенням (умова захисту гібридної трансмісії від перевищення частоти обертання); значення безперервного часу роботи ДВЗ $\tau_{\text{ДВЗ}}$ із мінімально

$$\begin{cases} n_{\partial} = 0 - \text{у режимах з вимкненим ДВЗ}; \\ n_{\partial} = n_{\partial}^{\min} \text{ при } V_a = 0; \\ n_{\partial} = n \cdot U_{mp} \leq n_{\partial}^{\max} \text{ при } V_a > 0, \end{cases} \quad (5)$$

де $n_{\partial}^{\min}, n_{\partial}^{\max}$ – мінімальна та максимальна робочі частоти обертання колінчастого вала ДВЗ, хв^{-1} .

Частота обертання вала MG1, хв^{-1} :

$$\begin{cases} n_{MG1} = 0 \text{ при } V_a = 0 \text{ з вимкненим ДВЗ}; \\ n_{MG1} = n_{\partial} \cdot (1 - U_{MG}) \text{ при } V_a = 0; \\ n_{MG1} = n \cdot U_{MG1} \leq n_{MG1}^{\max} \text{ при } V_a > 0. \end{cases} \quad (6)$$

У випадку застосування планетарної передачі у гібридній трансмісії між MG1 та MG2 передаточне відношення від ДВЗ буде визначатись як

$$U_{mp} = \frac{U_{MG1} - U_{MG} \cdot U_0}{1 - U_{MG}}. \quad (7)$$

Оскільки, передаточні відношення U_{MG} та U_0 є фіксованими та визначені конструкцією відповідних елементів трансмісії, то передаточне відношення трансмісії U_{mp} від ДВЗ в експлуатаційних режимах руху буде визначатись значенням U_{MG1} , тобто, частотою обертання вала MG1 у даному швидкісному режимі. Для конкретної енергоустановки ці передаточні відношення та закони їх управління будуть визначатись найвигіднішими з точки зору енергоефективності ДВЗ та електричних компонентів швидкісними та навантажувальними режимами роботи. Експериментальні стендові дослідження гібридної енергоустановки автомобіля Toyota Prius II у лабораторії кафедри двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету [11] дозволяють сформувати наступну емпіричну залежність для визначення U_{MG1} :

$$U_{MG1} = \left(2^{\frac{n}{82}-1.5} - 0.0017 \right) \cdot N^2 + \left(-0.000001734 n^2 + 0.001826 n + 0.058 \right) \cdot N + 2^{\frac{n}{120}+5.55} - 7.5. \quad (8)$$

У режимах з вимкненим ДВЗ

$$U_{MG1} = U_{MG} \cdot U_0. \quad (9)$$

Кінематичні параметри гібридної енергоустановки дозволяють визначити потужнісні показники. Для енергоустановки Toyota Prius II за результатами експериментальних досліджень визначена наступна залежність потужності ДВЗ від частоти обертання колінчастого вала, кВт:

$$\begin{aligned} N_e = & -88.57882 + 0.17682 \cdot n_{\partial} - 1.26655 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^2 + \\ & + 4.62688 \cdot 10^{-8} \cdot n_{\partial}^3 - 8.08273 \cdot 10^{-12} \cdot n_{\partial}^4 + 5.42612 \cdot 10^{-16} \cdot n_{\partial}^5. \end{aligned} \quad (10)$$

Потужність MG2 визначається залежно від режиму роботи, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{MG2} = 0 \text{ при } V_a = 0; \\ N_{MG2} = N \cdot \eta_{mp} - N_e \geq \\ \geq -\frac{N_{BAT}^{\max}}{\eta_{MG2}} \vee -N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у режимі рекуперативного гальмування при } S_{ch} < S_{ch}^{\max}; \\ N_{MG2} = \frac{N}{\eta_{mp}} \leq \frac{N_{BAT}^{\max}}{\delta_{BAT}^{ch}} \cdot \eta_{MG2} \vee N_{BAT}^{\max} \cdot \eta_{MG2} \vee N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у електричному режимі;} \\ N_{MG2} = k_{N_{etoMG}} \cdot N_e \cdot \eta_{MG1} \cdot \eta_{MG2} \leq N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (11)$$

Коефіцієнт розподілу потужності ДВЗ між електричними елементами та передачею на ведучі колеса визначається системою управління з урахуванням найоптимальніших режимів роботи електричних елементів за енергоефективністю. Для енергоустановки Toyota Prius II за результатами експериментальних досліджень визначена наступна залежність:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{N_{etoMG}} = -\frac{U_{MG1}}{4.2} \leq 1 \text{ при } U_{MG1} < 0; \\ k_{N_{etoMG}} = -2 \frac{U_{MG1}^{0.75}}{6} + 1 \text{ при } U_{MG1} \geq 0. \end{array} \right. \quad (12)$$

Потужність високовольтної батареї, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{BAT} = \frac{N_{MG2}}{\eta_{MG2}} \leq \frac{N_{BAT}^{\max}}{\delta_{BAT}^{ch}} \vee N_{BAT}^{\max} \text{ у електричному режимі;} \\ N_{BAT} = 0 \text{ у інших режимах.} \end{array} \right. \quad (13)$$

Потужність заряджання високовольтної батареї, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{BAT}^{ch} = -N_e \cdot \eta_{MG1} \geq -N_{BAT}^{\max} \text{ під час заряджання на зупинці та у електричному режимі;} \\ N_{BAT}^{ch} = N_{MG2} \cdot \eta_{MG2} \geq -N_{BAT}^{\max} \text{ у режимі рекуперативного гальмування при } S_{ch} < S_{ch}^{\max}; \\ N_{BAT}^{ch} = 0 \text{ при } S_{ch} \geq S_{ch}^{trg} \text{ або } S_{ch} \geq S_{ch}^{\max} \text{ або у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (14)$$

На основі даних про потужність елементів енергетичної установки з'являється можливість визначити показники ефективності перетворення енергії (коефіцієнти корисної дії (ККД), витрати та накопичення електричної енергії у високовольтній батареї, витрат повітря та палива ДВЗ, викидів забруднюючих речовин.

ККД гібридної трансмісії визначається залежно від режиму роботи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{emp} = 0 \text{ при } V_a = 0; \\ \eta_{emp} = \frac{N_{MG2}}{N} = \eta_{mp} - \frac{N_e}{N} \text{ у режимі рекуперативного гальмування;} \\ \eta_{emp} = \frac{N}{N_{MG2}} = \eta_{mp} \text{ у електричному режимі;} \\ \eta_{emp} = \frac{N}{N_e} = \eta_{mp} \cdot (k_{N_{etoMG}} \cdot (\eta_{MG1} \cdot \eta_{MG2} - 1) + 1) \text{ у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (15)$$

Поточна ємність високовольтної батареї у i -й момент часу, кВт·год:

$$Q_{BAT i} = Q_{BAT i-1} - (N_{BAT} + N_{BAT}^{ch}) \cdot \frac{d\tau}{3600} \leq Q_{BAT}^{\max}, \quad (16)$$

де $d\tau$ – розрахунковий проміжок часу, с.

Максимальна ємність батареї, кВт·год:

$$Q_{BAT}^{max} = m_{BAT} \cdot \rho_{Q_{BAT}} \cdot k_{Q_{BAT}}. \quad (17)$$

Максимальна потужність батареї, кВт:

$$N_{BAT}^{max} = k_{N_{BAT}} \cdot N_{BAT\ n}^{max}, \quad (18)$$

де $N_{BAT\ n}^{max}$ – номінальна максимальна потужність батареї, кВт.

Рівень заряду батареї, %:

$$S_{ch} = \frac{Q_{BAT}}{Q_{BAT}^{max}} \cdot 100. \quad (19)$$

Як встановлено за результатами експериментальних досліджень гібридної енергоустановки Toyota Prius II, система управління забезпечує керування швидкісним та навантажувальним режимом ДВЗ залежно від зовнішнього навантаження таким чином, що незалежно від швидкості автомобіля вплив на частоту обертання та ступінь відкриття дросельної заслінки ДВЗ має лише потужність на виході з енергоустановки, а між значеннями потужності та витрати повітря ДВЗ встановлюється лінійна залежність без впливу частоти обертання колінчастого вала. Отримана за результатами обробки даних експериментальних досліджень залежність витрати повітря ДВЗ має вигляд, кг/год:

$$G_{nov} = 8.26796 + 2.64415 \cdot N_e + 0.01114 \cdot N_e^2. \quad (20)$$

Годинна та питома витрати палива, ефективний ККД ДВЗ визначаються залежно від витрати повітря, ефективної потужності та теплоти згоряння палива за відомими залежностями [12].

Викиди забруднюючих речовин визначаються за відомою методикою, розробленою у Національному транспортному університеті з урахуванням концентрацій забруднюючих речовин у відпрацьованих газах, ефективності нейтралізації. Для визначення останньої може бути застосована методика, описана в роботі [13], яка враховує хімічні та температурні умови роботи системи нейтралізації. Концентрації основних забруднюючих речовин у відпрацьованих газах перед нейтралізатором за коефіцієнта надміру повітря $\alpha = 1$ описуються залежностями, визначеними за результатами експериментальних досліджень гібридної енергоустановки.

Концентрація CO, %:

$$C_{CO} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot N_e^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot N_e^2 + 4.6 \cdot 10^{-3} \cdot N_e + 0.5489. \quad (21)$$

Концентрації C_{mH_n} та NO_x , млн⁻¹:

$$C_{mH_n} = -2.7 \cdot 10^{-3} \cdot N_e^3 + 0.2362 \cdot N_e^2 - 7.9653 \cdot N_e + 271.08, \quad (22)$$

$$C_{NO_x} = 0.0337 \cdot N_e^3 - 3.8658 \cdot N_e^2 + 159.65 \cdot N_e + 1031.3. \quad (23)$$

Концентрація CO₂ визначається за методикою [13].

За визначеними витратою палива та викидами забруднюючих речовин енергоустановкою у окремих режимах роботи розраховуються сумарні за пройдений шлях та пробігові витрати і викиди, які дають можливість оцінити ефективність гібридної енергоустановки в умовах експлуатації автомобіля.

З використанням розробленої математичної моделі досліджено вплив коефіцієнтів максимальної ємності та потужності батареї на показники енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля за різних граничних швидкостей переходу в гібридний режим у їздовому циклі за Правилами ООН № 83 (рис. 3-7).

Ємність високовольтної батареї змінювали від максимальної (100 % номінальної ємності, вказаної у технічних характеристиках) до мінімально можливої (за якої можливе рушання з місця та розгін автомобіля до мінімальної швидкості переходу в гібридний режим без зниження рівня заряду нижче S_{ch}^{min}). Максимальну потужність батареї змінювали від максимальної (100 % номінальної потужності батареї, вказаної у технічних характеристиках) до мінімально можливої (за якої можливе рушання з місця та розгін автомобіля до мінімальної швидкості переходу в гібридний режим). Граничну швидкість переходу в гібридний режим задавали в межах від максимально можливої (обмеженої лише потужністю сил опору руху автомобіля, яка перевищує задану максимальну потужність батареї з урахуванням ККД елементів гібридного автомобіля, які забезпечують електромеханічне перетворення енергії) до мінімальної (визначеної умовами руху автомобіля з мінімальною швидкістю у гібридному режимі).

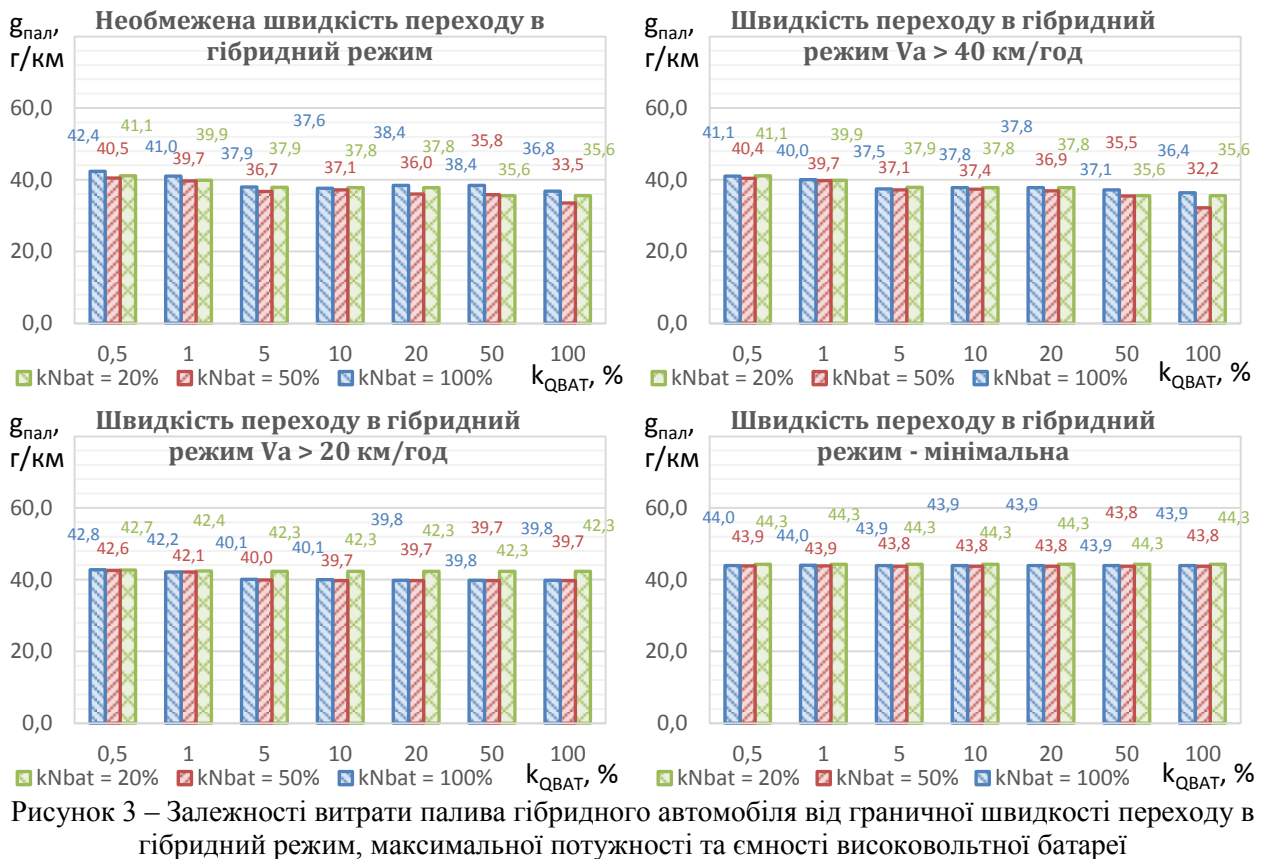
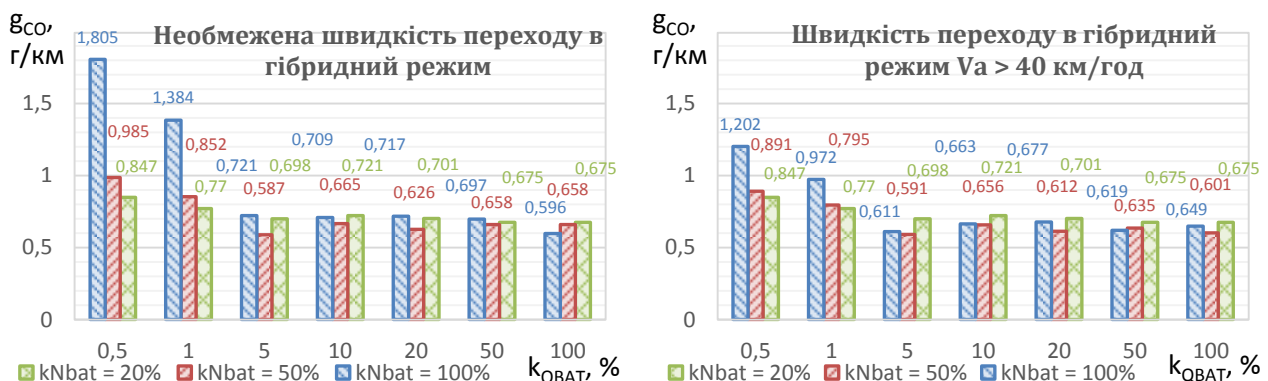


Рисунок 3 – Залежності витрати палива гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї



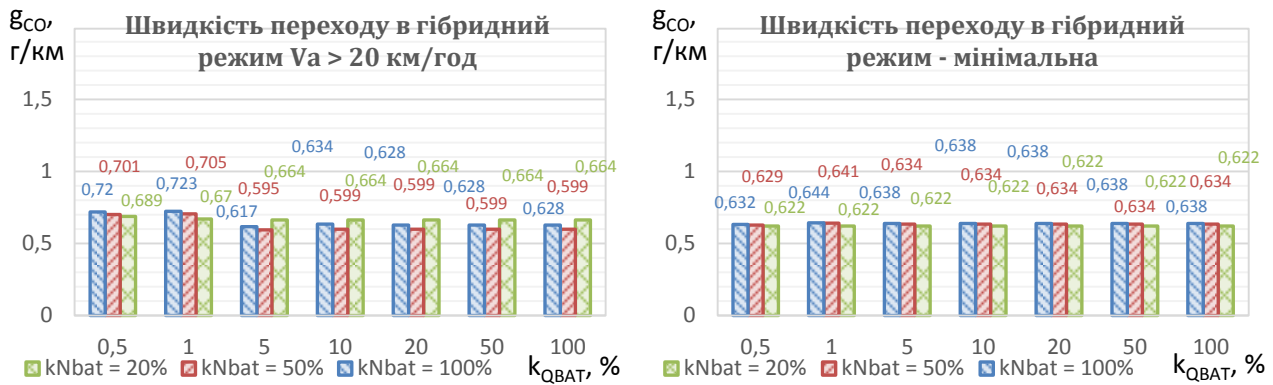


Рисунок 4 – Залежності викидів CO гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

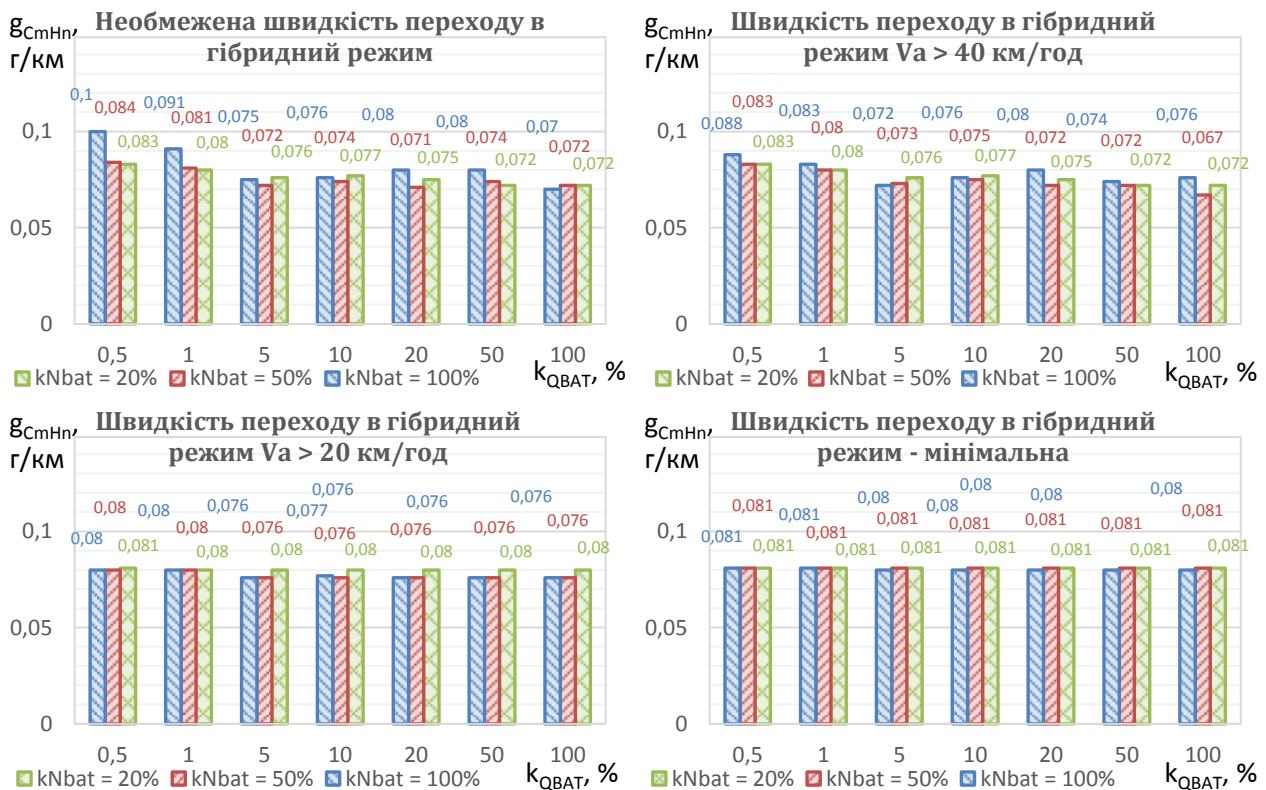
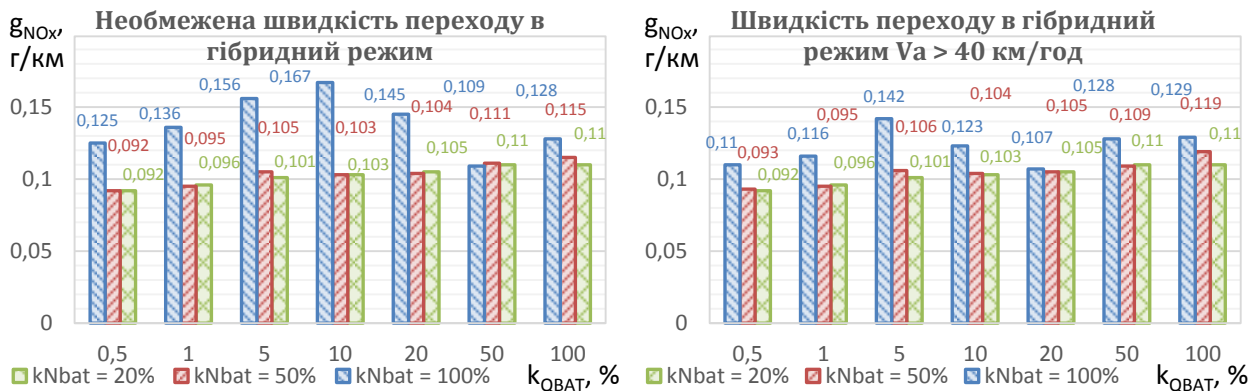


Рисунок 5 – Залежності викидів C_mH_n гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї



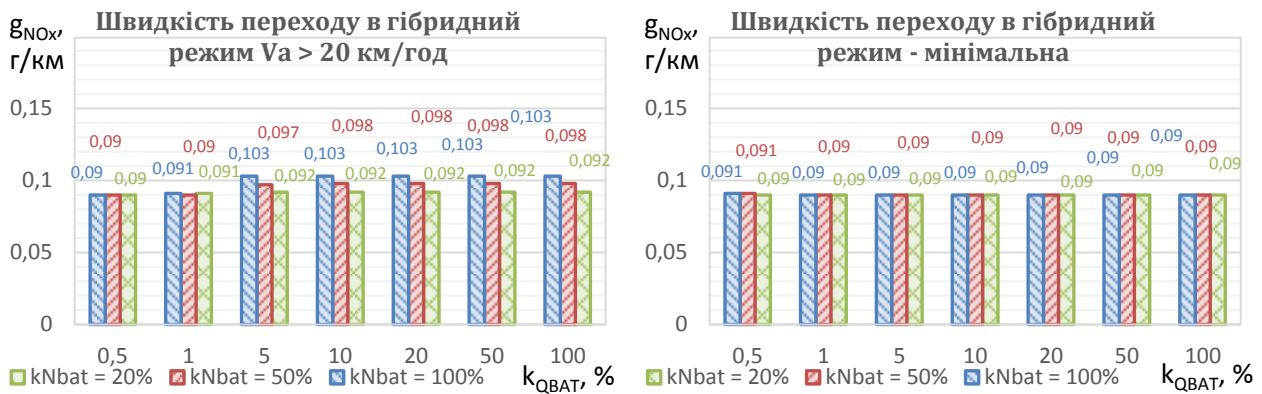


Рисунок 6 – Залежності викидів NO_x гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

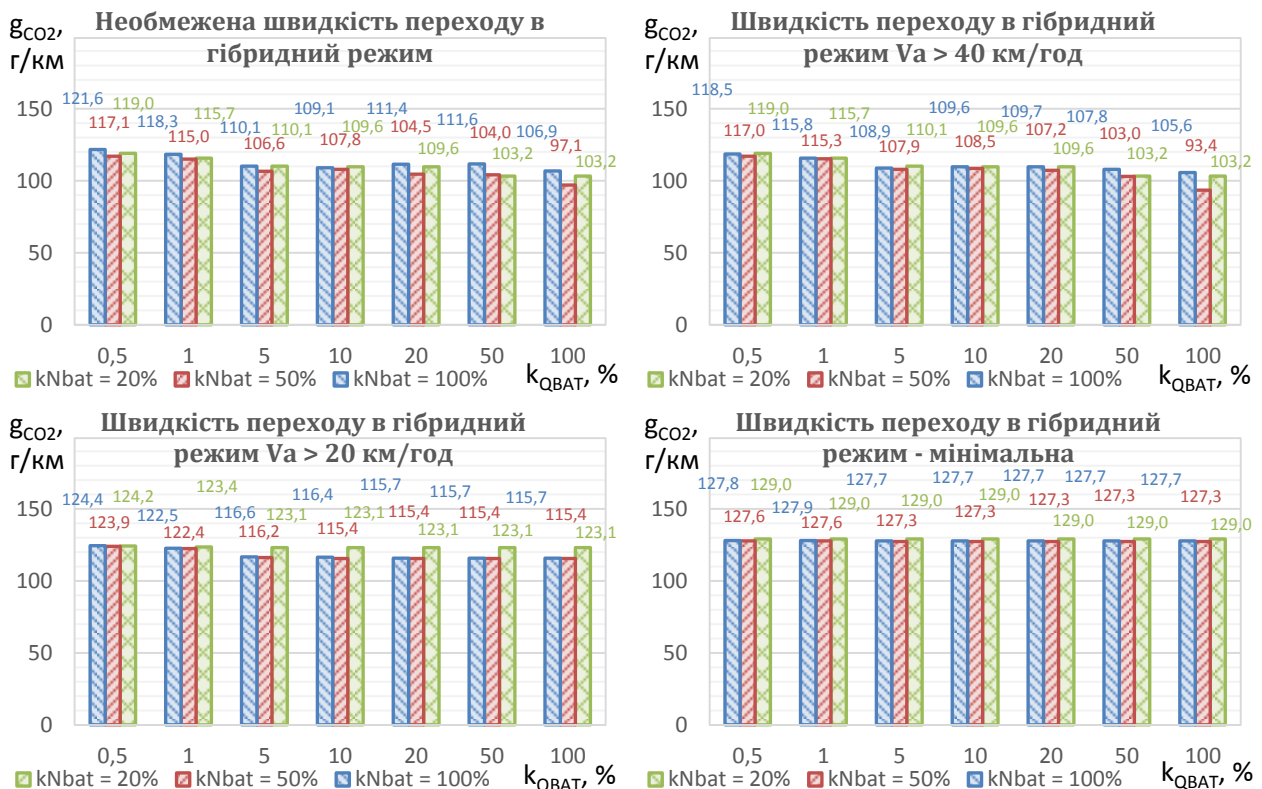


Рисунок 7 – Залежності викидів CO_2 гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно отриманих результатів, найменша витрата палива 32,2 г/км (рис. 3) досягається за умови переходу в гібридний режим за швидкостей понад 40 км/год при 100 % номінальної ємності та 50 % номінальної потужності батареї. Зменшення максимальної потужності до 20 % від номінальної призводить до зростання витрати палива до 35,6 г/км; за 100 % номінальної потужності витрата палива складає 36,4 г/км. При зменшенні ємності батареї витрата палива зростає, зокрема, в цьому режимі управління до 40,4-41,1 г/км. Використання стратегії управління енергоустановкою з переходом у гібридний режим за максимально можливих відповідно до умов руху швидкостей призводить до збільшення витрати палива до 33,5-40,5 г/км при 50 % номінальної потужності та до 36,8-42,4 г/км при 100 % номінальної потужності батареї; при 20 % номінальної потужності батареї витрата палива від зміни стратегії управління не залежить. Зниження швидкості переходу у гібридний режим до 20 км/год призводить до зростання витрати палива до 42,3-42,7, 39,7-42,6 та 39,8-42,8 г/км при 20 %, 50 % та 100 % номінальної потужності батареї відповідно. За мінімальної швидкості переходу у гібридний режим вплив максимальної потужності та ємності високовольтної батареї на витрату палива, яка складає близько 43,8-44,3 г/км, практично відсутній.

На викиди забруднюючих речовин мають одночасний вплив кілька факторів. З одного боку, це концентрації забруднювачів у продуктах згоряння та загальна кількість продуктів згоряння, які залежать від режиму роботи ДВЗ. З іншого – ефективність системи нейтралізації викидів, яка залежить від температурних умов і хімічного складу продуктів згоряння у нейтралізаторі. Тому, загальна тенденція зміни викидів від досліджуваних параметрів гібридного автомобіля певною мірою повторює тенденцію зміни витрати палива, але має відмінності від неї з урахуванням впливу утворення забруднювачів у циліндрах в різних режимах роботи та ефективності нейтралізації.

Внаслідок цього, менші викиди CO в межах 0,59-0,61 г/км (рис. 4) досягаються за умов, коли ДВЗ працює час, достатній для підтримання ефективного температурного режиму нейтралізатора, і, разом з тим, у режимах, які сприяють меншому утворенню забруднювачів та ефективніші за витратою палива. Це переважно умови зі швидкістю переходу у гібридний режим понад 20 км/год з максимальною потужністю батареї 50 % від номінальної та максимальною ємністю в межах 5-100 % від номінальної, а також окремі комбінації параметрів для швидкостей переходу в гібридний режим більше 40 км/год та максимально можливих для даних умов швидкостей. Суттєво зростають викиди CO до 0,77-1,8 г/км у для стратегій управління з максимально можливими та понад 40 км/год швидкостями переходу в гібридний режим при зниженні ємності батареї до 1 % і менше від номінальної. Для інших ємностей батареї за цих стратегій управління, а також для інших стратегій управління (крім вказаних вище комбінацій, за яких досягаються мінімальні викиди CO) спостерігаються підвищені викиди CO межах 0,62-0,72 г/км.

Менші викиди C_mH_n в межах 0,067-0,075 г/км (рис. 5) досягаються для окремих комбінацій параметрів для стратегій управління з максимально можливими та понад 40 км/год швидкостями переходу в гібридний режим з ємністю батареї в діапазоні 5-100 % від номінальної. При зменшенні ємності за цих стратегій управління викиди C_mH_n зростають до 0,08-0,1 г/км. При застосуванні стратегій управління з меншими швидкостями переходу в гібридний режим викиди C_mH_n є дещо підвищеними до 0,076-0,081 г/км практично незалежно від коефіцієнтів потужності та ємності батареї.

Менші викиди NO_x в межах 0,09-0,096 г/км (рис. 6) досягаються за умов, коли тривалість роботи у гібридному режимі найбільша: за управління з мінімальною швидкістю переходу в гібридний режим, при зниженні ємності батареї до 1 % від номінальної і нижче за інших стратегій управління, при зниженій максимальній потужності батареї. При збільшенні потужності батареї та швидкості переходу в гібридний режим за достатньої ємності батареї, коли частка електричних режимів зростає, викиди NO_x збільшуються до 0,1-0,167 г/км через погіршення ефективності нейтралізації внаслідок падіння температури носія нейтралізатора та недостатнього часу для відновлення оптимального температурного стану.

Викиди CO_2 за різних комбінацій параметрів гібридної енергоустановки та управління (рис. 7) змінюються за тими ж тенденціями, що і витрата палива, описаними вище. Менші викиди CO_2 93,4-104 г/км досягаються за умов швидкості переходу в гібридний режим понад 40 км/год та за максимально можливих швидкостей, ємності батареї 50-100 % номінальної та потужності батареї 20-50 %. При збільшенні потужності батареї до 100 % від номінальної викиди CO_2 дещо зростають до 105,6-111,6 г/км, через збільшення часу заряджання батареї. Зниження максимальної ємності батареї та швидкості переходу в гібридний режим призводить до збільшення викидів CO_2 до 115-129 г/км.

Таким чином, з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки гібридного автомобіля Toyota Prius II найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умови наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. За цих умов, можливе досягнення витрати палива на рівні 32,2-35,5 г/км, викидів CO – 0,601-0,635 г/км, C_mH_n – 0,067-0,072 г/км, NO_x – 0,109-0,119 г/км, CO_2 – 93,4-103 г/км. Порівнюючи отримані показники з відповідними показниками традиційного автомобіля з ДВЗ з подібними параметрами, наприклад, Skoda Fabia відповідно до результатів дослідження [13], можна визначити зменшення витрати палива з 55,78 г/км на 36,4-42,3%, викидів CO з 0,851 г/км на 25,4-29,4%, C_mH_n з 0,142 г/км на 49,3-52,8%, CO_2 з 174,5 г/км на 41-46,5% та збільшення викидів NO_x з 0,089 г/км на 22,5-33,7%. У випадку критичної втрати ємності батареї можлива реалізація стратегії управління з переходом у гібридний режим при мінімальній швидкості. У цьому випадку отримаємо показники витрати палива на рівні 43,8-44,3 г/км, викидів CO – 0,622-0,644 г/км, C_mH_n – 0,08-0,081 г/км, NO_x – 0,09-0,091 г/км, CO_2 – 127,3-129 г/км. У цьому випадку витрата палива збільшується порівняно з найбільш ефективним управлінням на 23,4-37,6%, викиди

CO – на 1,4-7,2%, C_mH_n – на 11,1-20,9%, CO_2 – на 23,6-38,1%, а викиди NO_x зменшуються на 16,5-24,4%. Порівняно з традиційним автомобілем гібридний автомобіль за управління з переходом у гібридний режим при мінімальній швидкості забезпечить зниження витрати палива на 20,6-21,5%, викидів CO – на 24,3-26,9%, C_mH_n – на 43-43,7%, CO_2 – на 26,1-27 % та збільшення викидів NO_x на 1,1-2,2%.

ВИСНОВКИ

На основі рівнянь потужнісного балансу з використанням результатів експериментальних досліджень розроблено математичну модель гібридного автомобіля Toyota Prius II, яка дозволяє визначити показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху.

Розроблено алгоритм вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов, дозволяє реалізувати конкретну стратегію управління та впливає на його показники енергоефективності та екологічної безпеки.

Для оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки запропоновано коефіцієнти максимальної ємності та потужності тягової батареї, а також граничну швидкість переходу у гібридний режим. Залежно від цих параметрів виконано математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

За результатами моделювання встановлено, що з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умови наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. Це дозволяє досягти зменшення витрати палива гібридного автомобіля порівняно з традиційним автомобілем з ДВЗ до 42 %, викидів CO до 29 %, C_mH_n до 52 %, CO_2 до 46% при зростанні викидів NO_x до 33 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Двадненко В., Дзюбенко О., Пушкар О. Розробка асинхронного електроприводу м'якого гібридного автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2022. № 22. С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.6>.
2. Сергієнко М.Є., Павлова Н.М., Сергієнко А.М., Любарський Б.Г., Борисенко А.М., Калинин П.М., Губский С.О., Древаль О.М. Результати моделювання компонентів і робочих процесів гібридного автомобіля з асинхронним електродвигуном. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2022. № 2. С. 31–47. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.04>.
3. Смирнов О.П. Науково-технічні основи підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів: автореф. дис. ... д-р техн. наук : 05.22.20. Харків, 2016. 40 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/2ef037f8-5ea9-4179-a75d-465ac98a3bcb/content>.
4. Бажинов О.В., Кравцов М.М. Визначення індексу якості електричних та гібридних транспортних засобів. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 5. С. 19-26. URL: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241023.19.989>.
5. Мауш Хакім. Підвищення енергоефективності автомобілів в умовах експлуатації за рахунок гібридних технологій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Харків, 2017. 18 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/7a33ca68-69ba-417b-8bf7-6d76162c4d3c>.
6. Taymaz I., Benli M. Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle. Fuel. 2014. № 115. p.p. 812–817. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.045>.
7. Saju C., Michael P.A., Jarin T. Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. № 52. p.p. 102087. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087>.
8. Wang Y., Wang Y., Ren G. A Brief Introduction to a Novel High-Efficiency Hybrid Power System for Hybrid Electric Urban Light Commercial Vehicles. SAE Int. J. Commer. Veh. 2021. № 14(2). p.p. 185-191. URL: <https://doi.org/10.4271/02-14-02-0014>.
9. Tomita M., Shibata R., Mizuno Y., Maeda H. et al. Development of New 2.0-Liter Plug-in Hybrid System for the Toyota Prius. SAE Technical Paper. 2024. № 2024-01-2169. 7 p. URL: <https://doi.org/10.4271/2024-01-2169>.
10. Сахно В.П., Безбородова Г.Б., Маяк М.М., Шарай С.М. Автомобілі: Тягово-швидкісні

властивості та паливна економічність: Навч. посібник. К.: В-во «КВІЦ», 2004. 174 с. URL: <https://library.ztu.edu.ua/doccard.php/119274>.

11. Садовник І.І. Експериментальні дослідження паливної економічності та екологічних показників автомобільної гібридної енергоустановки. Ювілейна наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2024. Вип. 80. С. 54. URL.: <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2024-80>.

12. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: підручник. К.: Арістей, 2007. 476 с.

13. Садовник І.Д. Поліпшення екологічних показників автомобіля удосконаленням процесу прогріву каталітичного нейтралізатора відпрацьованих газів: дис. ... д-р філософії : 274 - Автомобільний транспорт. Київ, 2024. 200 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1L7RWjY8zAz2g0vxpzaU3SxFhOkYdCRI9/view>.

REFERENCES

1. Dvadenko, V., Dziubenko, O., & Pushkar, O. (2022). Rozrobka asynkhronnoho elektropryvodu miakoho hibrydnogo avtomobilia [Asynchronous Motor in a Mild Hybrid Vehicle]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii – Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 22, 47–53. <https://doi.org/10.30977/veit.2022.22.0.6> [in Ukrainian].

2. Sergienko, N., Pavlova, N., Sergienko, A., Lyubarsky, B., Borysenko, A., Kalinin, P., Gubskiy, S., & Dreval, O. (2023). Rezultaty modeliuvannia komponentiv i robochych protsesiv hibrydnogo avtomobilia z asynkhronnym elektrodvyhunom [Results of Modeling of Components and Working Processes of a Hybrid Car with an Asynchronous Motor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Avtomobile-ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automobile and Tractor Construction*, 2, 31–47. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.04> [in Ukrainian].

3. Smyrnov, O.P. (2016). Naukovo-tekhichni osnovy pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii hibrydnykh transportnykh zasobiv [Scientific and technical basis of increasing the operational efficiency of hybrid vehicles]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

4. Bazhynov, O. V., & Kravtsov, M. M. (2023). Vyznachennia indeksu yakosti elektrychnykh ta hibrydnykh transportnykh zasobiv [Determining the Quality Index of Electric and Hybrid Vehicles]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5, 19–26. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241023.19.989> [in Ukrainian].

5. Maush, Khakim. (2017). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti avtomobiliv v umovakh ekspluatatsii za rakhunok hibrydnykh tekhnologii [Increase of the energy efficiency of vehicles by the use of hybrid technologies]. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

6. Taymaz, I., & Benli, M. (2014). Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle. *Fuel*, 115, 812–817. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.045> [in English].

7. Sajū, C., Michael, P. A., & Jarin, T. (2022). Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102087. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087> [in English].

8. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, G. (2021). A Brief Introduction to a Novel High-Efficiency Hybrid Power System for Hybrid Electric Urban Light Commercial Vehicles. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 14(2), 185–191. <https://doi.org/10.4271/02-14-02-0014> [in English].

9. Tomita, M., Shibata, R., Mizuno, Y., Maeda, H., Murasato, K., Shimura, A., Takayama, T., Nakado, T., & Tomita, Y. (2024). Development of New 2.0-Liter Plug-in Hybrid System for the Toyota Prius. *SAE Technical Paper Series*, 1. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2169> [in English].

10. Sakhno, V. P., Bezborodova, H. B., Maiak, M. M., & Sharai, S. M. (2004). *Avtomobili: Tiahovoshvydkisni vlastyvoli ta palyvna ekonomichnist: Navch. posibnyk. [Automobiles: Traction–speed characteristics and fuel economy [Textbook]. Kyiv, Ukraine: KVITS Publishing House. Retrieved from <https://library.ztu.edu.ua/doccard.php/119274> [in Ukrainian].*

11. Sadovnyk I.I. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilnoi hibrydnoi enerhoustanovky [Experimental studies of fuel efficiency and environmental performance of an automotive hybrid power unit]. *Yuvileina naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremlyenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu – Scientific Conference of Teaching Staff, Postgraduates, Students and Staff of*

Separate Structural Units of the University, 80, 54. <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2024-80> [in Ukrainian].

12. Abramchuk F.I., Hutarevych Yu.F., Dolhanov K.Ie., Tymchenko I.I. (2007). Avtomobilni dvyhuny: pidruchnyk [Automotive engines: a textbook]. Kyiv, Ukraine: Aristei [in Ukrainian].

13. Sadovnyk I.D. (2024). Polipshennia ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilia udoskonalenniam protsesu prohrivu katalitychnoho neitralizatora vidpratsovanykh haziv [Improvement of the ecological indicators of a car by improving the warming-up process of the catalytic converter for exhaust gases.]. PhD thesis. Kyiv: NTU [in Ukrainian].

Tsiuman M.P., Sadovnyk I.I. Improvement of energy efficiency and environmental safety indicators of a hybrid vehicle through rational selection of its control parameters.

In the article, based on power balance equations and using the results of experimental studies, a mathematical model of the Toyota Prius II hybrid vehicle has been developed, which makes it possible to determine its energy efficiency and environmental safety indicators under specified driving conditions.

An algorithm for selecting the operating mode of a hybrid vehicle has been developed, which is achieved depending on driving conditions, power unit parameters, and the fulfillment of control and boundary conditions. This algorithm enables the implementation of a specific control strategy and influences the vehicle's energy efficiency and environmental safety indicators.

To evaluate the influence of the hybrid vehicle power unit parameters and its control on energy efficiency and environmental safety indicators, coefficients of maximum capacity and power of the traction battery, as well as the threshold speed for switching to hybrid mode, are proposed. Depending on these parameters, mathematical modeling of the energy efficiency and environmental performance of the Toyota Prius II hybrid vehicle was carried out in a driving cycle according to UNECE Regulation No. 83.

Based on the simulation results, it was established that, from the standpoint of improving energy efficiency and environmental safety indicators, the most effective approach is to use a control strategy with switching to hybrid mode at speeds above 40 km/h, ensuring that the electric power drawn from the traction battery does not exceed 50% of its nominal value, provided that the battery maximum capacity is within 50-100% of nominal capacity. This makes it possible to reduce the fuel consumption of the hybrid vehicle compared to a conventional ICE vehicle by up to 42%, CO emissions by up to 29%, C_mH_n by up to 52%, and CO₂ by up to 46%, while NO_x emissions increase by up to 33%.

Keywords: power balance, hybrid vehicle, energy efficiency, environmental safety, control parameters, traction battery, hybrid mode, driving cycle.

ЦЮМАН Микола Павлович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: tsuman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2537-8010>.

САДОВНИК Ігор Іванович, аспірант кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: igorsid100@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4699-2079>.

Mykola TSIUMAN, Ph.D. in Engineering, Professor, Head of Department of Engines and Heating Engineering, National Transport University, e-mail: tsuman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2537-8010>.

Ihor SADOVNYK, Postgraduate Student, Department of Engines and Heating Engineering, National Transport University, e-mail: igorsid100@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4699-2079>.

Дата надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

<https://doi.org/10.36910/rg59qe08>

Шепеленко І.В.¹, Шумляківський В.П.², Красота М.В.³, Осін Р.А.³, Червоний Т.В.³¹Центральноукраїнський національний технічний університет²Державний університет «Житомирська політехніка»³Центральноукраїнський національний технічний університет

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МИТТЯ АВТОМОБІЛІВ

Обов'язковою умовою якісного виконання робіт з технічного обслуговування автомобілів є їх миття. При цьому забезпеченість більшості автосервісних підприємств нашої держави обладнанням для миття автомобілів залишається на недостатньому рівні через відсутність сучасних мийних станцій, недосконалість використовуваних технологій, низьку якість матеріалів та ін. Традиційні методи миття автомобілів постають перед викликами сталого розвитку, які пов'язані з високою питомою витратою енергоресурсів та значним споживанням води. Обґрунтування вибору обладнання для миття автомобілів є важливим завданням, що забезпечить необхідну ефективність та якість виконання ТО, екологічність, енерго- та ресурсозбереження, а також підвищить конкурентоспроможність підприємств автомобільного сервісу. Огляд літературних джерел дозволив відзначити основні напрямки сучасних досліджень даної послуги сервісного обслуговування, які в основному стосуються використання різних систем очищення та регенерації води, сонячних батарей, а також впровадження повної автоматизації при митті автомобілів. Разом з тим, встановлено відсутність робіт, пов'язаних з встановленням критеріїв для вибору типу обладнання для миття автомобілів. На підставі аналізу сучасних технологій миття автомобілів та обладнання, що застосовуються при цьому, запропоновано їх класифікацію за рядом ознак. Наведено дані про технічні характеристики різних типів обладнання для миття автомобілів. Встановлено, що визначальними показниками при виборі типу обладнання для миття автомобілів є їх технічні та експлуатаційні характеристики з урахуванням показників економічної доцільності та сучасних екологічних вимог. Зазначено про подальшу перспективність створення мийок самообслуговування в умовах міста Кропивницький.

Ключові слова: автосервісне підприємство, сервісні послуги, технології миття автомобілів, обладнання для миття автомобілів, безконтактні системи миття, автоматика самообслуговування

ВСТУП

Однією із тенденцій розвитку автомобільної галузі в нашій країні є стрімке зростання кількості автомобілів. Якщо в Україні на кінець 2024 р., за даними [1], на обліку перебувало 13,16 млн. транспортних засобів (з них легкових – 9,8 млн.), то у 2025 р. ще було імпортовано 444 860 автомобілів [2]. Цілком зрозуміло, що збільшення автопарку зумовлює попит на якісне технічне обслуговування (ТО). Серед обов'язкових умов якісного виконання робіт з ТО слід виокремити миття автомобілів. Своєчасне виконання цієї операції дозволяє знизити можливість виникнення корозії, зберегти лакофарбове покриття, забезпечити зовнішній огляд, а саме – доступ до окремих вузлів і деталей автомобіля при виконанні різних видів робіт з ТО й ремонту [3]. Таким чином, регулярне миття автомобілів є одним з основних видів ТО транспортного засобу [4].

На сьогодні ринок послуг автосервісу представлений великою кількістю технологій миття автомобілів, також обладнання для їх здійснення. Разом з тим, миття автомобілів залишається достатньо трудомісткою операцією ТО автомобілів (середня трудомісткість ручного миття вантажного автомобіля складає 15-35 чол.-хв.) [5]. Високий рівень продуктивності та якості виконання мийних робіт може бути забезпечений їх повною механізацією та автоматизацією.

Забезпеченість більшості автосервісних підприємств нашої держави обладнанням для миття автомобілів залишається на недостатньому рівні через відсутність сучасних мийних станцій, недосконалість технологій, що використовуються, низьку якість матеріалів.

Слід також відзначити, що традиційні методи миття автомобілів постають перед викликами сталого розвитку [6], які пов'язані з високою питомою витратою енергоресурсів та значним споживанням прісної води. За даними [7] миття автомобілів залишається суттєвим фактором водопостачання та забруднення. Тому, вельми важливим постає питання впровадження сучасних технологій миття автомобілів, що відповідають принципам сталого розвитку із забезпеченням екологічності, енерго- та ресурсозбереження. Такі умови можуть бути забезпечені за рахунок обґрунтованого вибору і використання сучасного обладнання для миття автомобілів, що гарантують економію води та електроенергії та відповідність екологічним нормам [8].

Отже, обґрунтування вибору обладнання для миття автомобілів є актуальним завданням, що забезпечить необхідну ефективність та якість виконання ТО, екологічність, енерго- та

ресурсозбереження, а також підвищить конкурентоспроможність підприємств автомобільного сервісу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Різноманітним аспектам щодо підвищення ефективності використання сучасних технологій миття автомобілів з урахуванням умов сьогодення присвячено ряд робіт вітчизняних та закордонних дослідників.

У роботі [9] засвідчено про стрімкий розвиток ринку надання послуг з миття автомобілів. Автори наводять такі данні щодо частоти використання цих послуг в Україні, Європі та США. Середній показник користування професійною автомийкою на одного власника автомобіля становить: в Європі – 10,5; у США – 13,6; в Україні – 13,2.

У роботі [7] представлено огляд ефективних сучасних технологій очищення стічних вод з автомийок. Автор зазначає, що стічні води з автомийок є джерелом забруднення води. Їх очищення має вирішальне значення не тільки з точки зору запобігання забрудненню навколишнього середовища, але й з точки зору повторного використання води. Доведено ефективність застосування комбінованих технологій очищення стічних вод.

Сучасне обладнання для автомийок, за даними [10], вміщує: високоефективні сушарки; передові системи рекуперації води та безконтактні опції миття, що забезпечують бездоганну чистоту без пошкодження поверхні автомобіля. Такі технології розроблені для забезпечення комплексного та безпечного процесу очищення та можливості виконання процесу миття у найважко доступніших місцях автомобіля.

Високоефективне обладнання для миття автомобілів означає використання передових систем регенерації води, які збирають, фільтрують і повторно використовують воду [11]. Це дозволяє скоротити споживання води на 80%. Впровадження сонячних батарей зменшує залежність від різних видів палива. Застосування роботизованих маніпуляторів та безконтактних систем миття дозволяє використовувати мінімальну кількість води та хімікатів, мінімізуючи відходи та підвищуючи продуктивність.

Міжнародна асоціація автомийок виділяє три основні типи автомийок: стаціонарні автоматичні; порталні автоматичні автомийки; самообслуговування. За даними [12] в Європі близько 64 % власників автомобілів віддають перевагу автомийкам самообслуговування; 6 % – ручним автомийкам; 30 % – автоматичними автомийками.

У літературних джерелах наявна досить суперечлива інформація. Наприклад, автори [12], порівнюючи витрати ресурсів (електроенергії, води) різними видами мийки, автори доводять переваги тунельних автоматизованих установок. Разом з тим, за даними Міжнародної асоціації автовиробників [12] автомийки самообслуговування використовують найменшу кількість води – близько 75 л за цикл при споживанні електроенергії від 0,8 до 2,5 кВт год.

Збільшення попиту на мийки самообслуговування характерно і для нашої країни. При відсутності офіційної статистики можна зазначити, що якщо у 2018 р. в Україні кількість автомийок самообслуговування приблизно складала 15 % від загальної кількості, то зараз їх частка набагато вища (рис. 1).



Рисунок 1 – Мийка самообслуговування у м. Кропивницький

Серед очевидних переваг даного типу миття слід відзначити значно нижчу вартість послуги порівняно з іншими та можливість самостійно виконати дану операцію.

Разом з тим, власники автомобілів продовжують користуватися ручними мінімийками (рис. 2).



Рисунок 2 – Миття автомобілів з використанням ручної мінімийки

Статистика продажу даного типу мийок в Україні має такі характерні риси (рис. 3) [13].

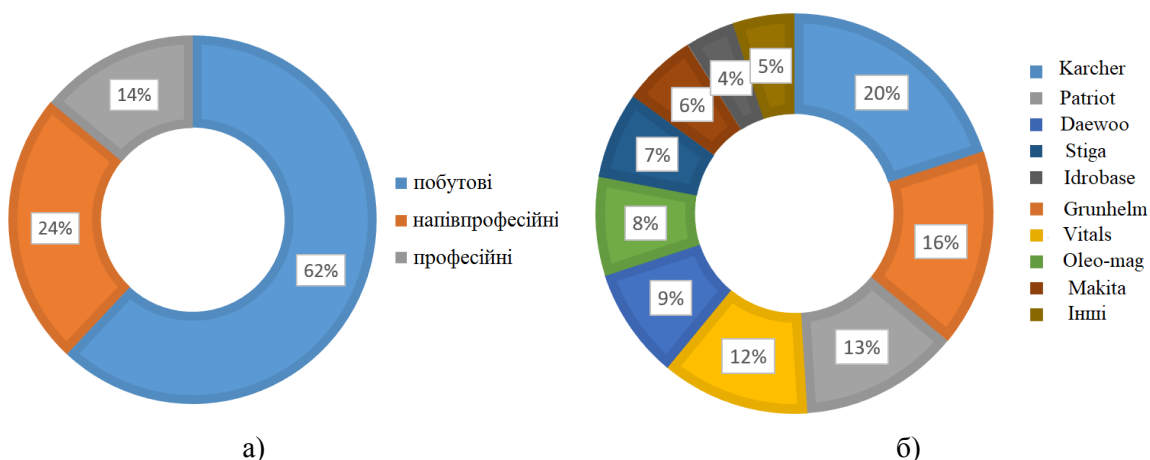


Рисунок 3 – Статистика продажу мінімийок за типом (а) та брендом (б) [13]

Аналіз представлених робіт дозволяє відзначити основні напрямки сучасних досліджень даної послуги сервісного обслуговування, що обумовлені:

- екологічними вимогами (автори [7, 14] пропонують використання різних систем очищення стічних вод);
- дефіцитом прісної води (у роботах [12, 15, 16] розглядаються питання використання систем регенерації води, сонячних батарей, роботизованих маніпуляторів);
- підвищенням якості миття автомобілів (впровадження повністю автоматизованих систем [17]).

Разом з тим, слід відзначити відсутність робіт пов'язаних з обґрунтуванням вибору типу обладнання для миття автомобілів, а також критеріїв для їх визначення.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка підходу щодо вибору обладнання для миття автомобілів. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- представити класифікацію сучасного обладнання для миття автомобілів за різними класифікаційними ознаками;
- запропонувати критерії для вибору автономного обладнання;
- надати практичні рекомендації щодо вибору типу миття автомобілів в умовах м. Кропивницького.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасний світовий ринок обладнання для миття автомобілів різноманітний та охоплює близько 450 тис. автомийок [18]. При цьому відомі способи миття автомобілів, а також обладнання, що використовується при цьому, можна класифікувати за різними ознаками. Аналіз наявних джерел [3-5] з даного питання дозволило запропонувати наступні класифікації (рис. 4, 5).

Слід зазначити, що наведені класифікації є незалежними тому, що, наприклад, портална й тунельна мийки можуть бути як контактними, так і безконтактними й навіть комбінованими залежно від конструкції обладнання.

Для порівняння особливостей використання різного типу обладнання для миття автомобілів проаналізовано їх технічні характеристики (табл.1, 2) [3-5].

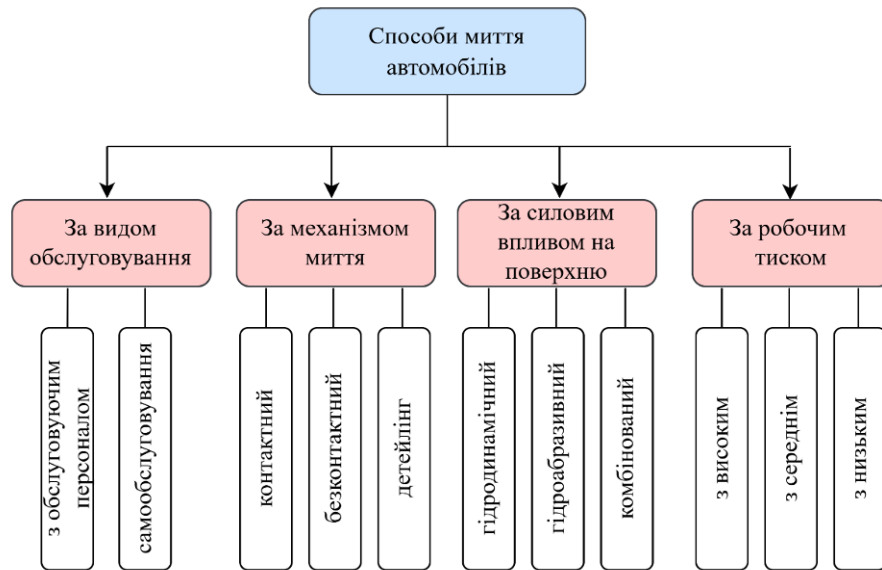


Рисунок 4 – Класифікація способів миття автомобілів [3-5]

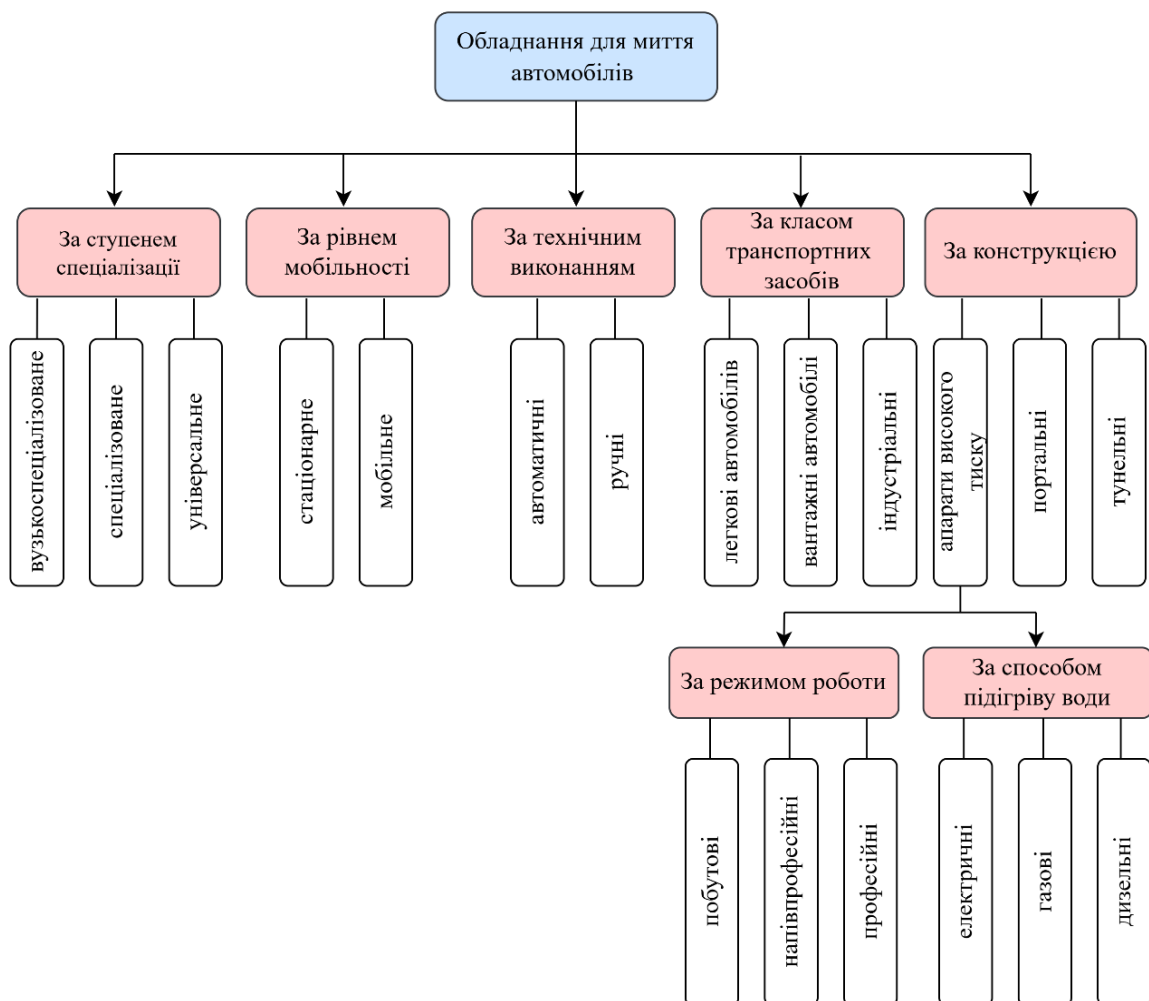


Рисунок 5 – Класифікація обладнання для миття автомобілів [3-5]

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика різних типів обладнання для миття автомобілів [3-5]

Тип обладнання	Витрати води, л/авто	Тиск води, бар	Продуктивність, авто/год	Рівень автоматизації
Ручна (портативна)	120-180	100-180	2-3	Низький
Портальна	150-200	70-120	8-12	Високий
Тунельна	300-480	100-150	30-40	Повний
Самообслуговування	80-140	100-250	3-5	Середній

Таблиця 2 – Споживання електроенергії та миючих засобів [3-5]

Тип обладнання	Споживання електроенергії, кВт·год/авто	Особливості використання миючих засобів
Ручна (портативна)	1,2...3	Універсальні автошампуні
Портальна	2,4...4,5	Висококонцентровані автошампуні
Тунельна	3,2...6,0	Поетапне використання різних типів засобів
Самообслуговування	0,8...2,2	Багатокомпонентні склади

Аналіз даних (табл. 1) [3-5] дозволив визначити основні переваги та недоліки кожного з типів обладнання (табл. 2) [3-5]. Ці дані є, безумовно, суб'єктивні та ґрунтуються на практичному досвіді авторів даної роботи.

Таблиця 3 – Перспективи використання різних типів обладнання

Тип обладнання	Переваги	Недоліки	Перспективи
Ручна (портативна)	Низька вартість обладнання	Висока трудомісткість, низька продуктивність	Індивідуальне користування
Портальна	Висока якість миття, високий рівень автоматизації,	Висока вартість обладнання	СТО
Тунельна	Найвищі: продуктивність, автоматизація, якість миття	Потребує великих капіталовкладень та наявних площ	Великі таксомоторні парки
Самообслуговування	Низька вартість миття	Висока трудомісткість	Для користування у місті

Таким чином, на нашу думку, визначальними показниками для вибору типу обладнання мають бути їх технічні та експлуатаційні характеристики з урахуванням економічної доцільності та сучасних екологічних вимог. Саме ці групи показників формують ті вимоги, що висувають підприємство, що надає послуги з миття автомобілів (надійність, вартість обладнання та ін.), споживач, що користується даною послугою (якість, собівартість миття та ін.) та екологічні стандарти, що висуває держава.

Наявність технічного критерію дозволяє відображати здатність (рис. 6) обладнання виконувати його основну функцію – якісне миття автомобілів, та включає його пропускну здатність (продуктивність), рівень автоматизації та технічні характеристики.

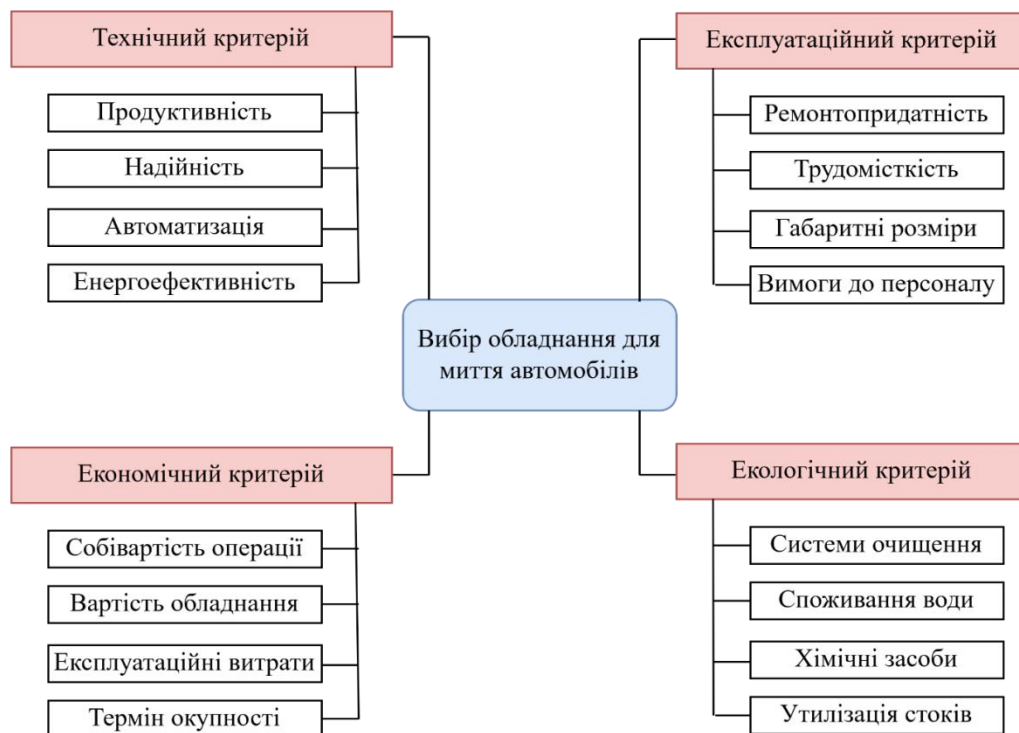


Рисунок 6 – Основні критерії вибору обладнання для миття автомобілів

Експлуатаційний критерій характеризує надійність роботи обладнання та враховує його ремонтпридатність, трудомісткість технічного обслуговування та виконання робіт, габаритні розміри тощо.

Економічний критерій визначає економічну ефективність миття автомобілів та визначає собівартість виконання операції, вартість обладнання та його термін окупності та інші експлуатаційні витрати.

Екологічний критерій контролює дотримання вимоги до захисту навколишнього середовища та вміщує використання різних систем очищення та рециркуляції води, споживання води, використання хімічних засобів тощо.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На нашу думку, в умовах м. Кропивницького з врахуванням добового потоку автомобілів з точки зору інвестування найбільш привабливим виглядають мийки самообслуговування, які мають найменший термін окупності. Крім того, серед безперечних переваг цього типу автомийок слід відзначити здатність самостійно впливати на процес миття автомобілів та можливість цілодобово забезпечити роботу підприємства з мінімальною кількістю працівників. Серед найбільш популярних автомийок самообслуговування м. Кропивницького слід відзначити Best Car Wash та Lux Wash.

Таким чином, можна стверджувати, що при виборі типу обладнання для миття автомобілів слід враховувати комплекс факторів. Наведені дані можуть слугувати практичними рекомендаціями щодо вибору типу миття автомобілів як для підприємств автосервісу так і для споживачів даної послуги.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних технологій миття автомобілів та обладнання, що використовується при цьому, дозволило запропонувати їх класифікацію за основними ознаками. Зокрема, для різних способів та технологій миття таким ознаками є: вид обслуговування, механізм миття, вплив на поверхню миття, робочий тиск води. Обладнання для миття класифіковано за: ступенем спеціалізації, рівнем мобільності, технічним виконанням, класом транспортних засобів, конструкцією, режимом роботи, способом підігріву води.

2. Встановлено, що визначальними факторами при виборі типу обладнання для миття автомобілів є технічні, експлуатаційні, економічні та екологічні показники. Врахування цих показників може слугувати практичними рекомендаціями при виборі технології та обладнання для миття автомобілів.

3. Сучасний рівень розвитку технологій миття автомобіля дозволяє власникам автомобіля зробити свій оптимальний вибір типу автомийного комплексу, що підвищує якість виконання

автосервісних послуг. Враховуючи існуючі тенденції на ринку послуг м. Кропивницького можна стверджувати про перспективність автоматизованих та безконтактних систем миття, а також мийок самообслуговування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Скільки авто насправді в Україні? Чому точні дані не називають і які можуть бути наслідки: веб-сайт. URL: <https://auto.rbc.ua/rus/news/-skilki-vsogo-ukrayini-mashin-chomu-mozhna-1750949039.html> (дата звернення: 10.04.2026).
2. Скільки авто щомісяця завозять в Україну: статистика імпорту та тренди ринку: веб-сайт. URL: https://delo.ua/auto/skilki-avto-shhomisyacya-zavozyat-v-ukrayinu-statistika-importu-ta-trendi-rinku-462824/?utm_source=copilot.com (дата звернення: 10.04.2026).
3. Красота М.В., Кулешков Ю.В., Магопєць С.О., Шепеленко І.В., Бєвз О.В., Осін Р.А., Руденко Т.В. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів : Навчальний посібник. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 208 с.
4. Шепеленко І.В., Красота М.В., Шумляківський В.П. Сучасні технології миття автомобілів // Матеріали XII міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (16-18 квітня 2024 р.), Вінниця: ВНТУ, 2024. – С.357 – 359.
5. Шепеленко І.В., Красота М.В. Особливості надання автосервісних послуг у сучасних умовах. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту (Innovative Technologies for the Development and Efficiency of Road Transport) : VIII-а Міжн. наук.-практ. конф., м. Кропивницький, 19-21 листопада 2025 р.: тези доповіді.* Кропивницький, 2025. С. 9-11.
6. Іванченков В.С. Обґрунтування викликів сталого розвитку в умовах глобальної нестабільності. *Економічний простір*, 2025. 201. С. 304-310.
7. Sarmadi, M., Foroughi, M., Najafi Saleh, H. *et al.* Efficient technologies for carwash wastewater treatment: a systematic review. *Environ Sci Pollut Res* 27, 34823–34839 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09741-w>.
8. Dadebo D, Ibrahim MG, Fujii M, Nasr M. Transition towards Sustainable Carwash Wastewater Management: Trends and Enabling Technologies at Global Scale. *Sustainability*. 2022; 14(9):5652. <https://doi.org/10.3390/su14095652>.
9. Чала Т. Г. Методологічні аспекти збору первинних даних: порівняння поведінки споживачів послуг з миття автомобілів в Україні, Європі та США/ Т. Г. Чала, Д. Б. Савченко. *Бізнес Інформ*. 2023. № 12. С. 135-143. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2023_12_19.
10. Revolutionizing Car Wash Technology: The Future of Sustainable Car Washes: веб-сайт. URL: https://www.sustainablebusiness toolkit.com/car-wash-technology/?utm_source=copilot.com (дата звернення: 10.04.2026).
11. THE FUTURE OF SUSTAINABILITY IN THE CAR WASH INDUSTRY: веб-сайт. URL: https://www.superiorcarwashsupply.com/blog/future-of-sustainability-in-car-wash-industry?utm_source=copilot.com (дата звернення: 10.04.2026).
12. M J Geca 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2130 012004.
13. Рейтинг мінімийок високого тиску - ТОП 16: веб-сайт. URL: <https://storgom.ua/ua/novosti/rejting-minimoek.html> (дата звернення: 10.04.2026).
14. Hamdi, N., Boumnijel, I., Mosbahi, M. *et al.* Degradation/mineralization of carwash wastewater by coupled process electrocoagulation/electro-Fenton. *Chem. Pap.* (2026). <https://doi.org/10.1007/s11696-026-04780-y>.
15. Thomas, M., Drzewicz, P., Więckol-Ryk, A. *et al.* Effectiveness of potassium ferrate (VI) as a green agent in the treatment and disinfection of carwash wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 29, 8514–8524 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16278-z>.
16. Dadebo, D., Nasr, M., Fujii, M., Ibrahim, M.G. (2022). Coagulation/Flocculation Treatment of Carwash Wastewater Using Natural-Based Material: A Sustainable Development Approach. In: Jeon, HY. (eds) Sustainable Development of Water and Environment. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07500-1_12.
17. Мороз, О., & Алієв, Я. (2024). Автоматизація стандартних процесів станцій технічного обслуговування автомобілів за допомогою роботизованих систем. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні

технології. Автоматизовані системи управління», 63, 60-72. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-63-06>.

18.Carwash Industry Statistics: веб-сайт. URL: https://worldmetrics.org/carwash-industry-statistics/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.04.2026).

REFERENCES

1.Skilky avto naspravdi v Ukraini? Chomu tochni dani ne nazyvaiut i yaki mozhut buty naslidky: veb-sait. URL: <https://auto.rbc.ua/rus/news/-skilki-vsogo-ukrayini-mashin-chomu-mozhna-1750949039.html> (data zvernennia: 10.04.2026).

2.Skilky avto shchomisiatsia zavoziat v Ukrainu: statystyka importu ta trendy rynku: veb-sait. URL: https://delo.ua/auto/skilki-avto-shhomisyacya-zavozyat-v-ukrayinu-statistika-importu-ta-trendi-rinku-462824/?utm_source=copilot.com (data zvernennia: 10.04.2026).

3.Krasota, M.V., Kulieshkov, Yu.V., Mahopets, S.O., Shepelenko, I.V., Bevez, O.V., Osin, R.A. & Rudenko T.V. (2023) Tekhnolohichne obladnannia dlia obsluhovuvannia ta remontu avtomobiliv : Navchalnyi posibnyk. – Kropyvnytskyi: TsNTU., – 208 s. (in Ukrainian).

4.Shepelenko, I.V., Krasota, M.V. & Shumliakivskyi V.P. (2024) [Suchasni tekhnolohii myttia avtomobiliv. Materialy XII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu» (16-18 kvitnia 2024 r.)], Vinnytsia: VNTU. – pp.357 – 359. (in Ukrainian).

5.Shepelenko I.V., Krasota M.V. (2025) Osoblyvosti nadannia avtoservisnykh posluh u suchasnykh umovakh. [Innovatsiini tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu (Innovative Technologies for the Development and Efficiency of Road Transport) : VIII-a Mizhn. nauk.-prakt. konf., m. Kropyvnytskyi, 19-21 lystopada 2025 r.: tezy dopovidy. Kropyvnytskyi,]. pp. 9-11. (in Ukrainian)

6.Ivanchenkov, V.S. (2025) Obgruntuvannia vyklykiv staloho rozvytku v umovakh hlobalnoi nestabilnosti. [Ekonomichnyi prostir], pp. 304-310. (in Ukrainian)

7.Sarmadi, M., Foroughi, M., Najafi Saleh, H. *et al.* Efficient technologies for carwash wastewater treatment: a systematic review. *Environ Sci Pollut Res* 27, 34823–34839 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09741-w>.

8.Dadebo D, Ibrahim MG, Fujii M, Nasr M. Transition towards Sustainable Carwash Wastewater Management: Trends and Enabling Technologies at Global Scale. *Sustainability*. 2022; 14(9):5652. <https://doi.org/10.3390/su14095652>.

9.Chala, T. H. & Savchenko, D. B. (2023) Metodolohichni aspekty zboru pervynnykh danykh: porivniannia povedinky spozhyvachiv posluh z myttia avtomobiliv v Ukraini, Yevropi ta SShA [Biznes Inform. № 12]. pp. 135-143. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2023_12_19. (in Ukrainian)

10.Revolutionizing Car Wash Technology: The Future of Sustainable Car Washes: веб-сайт. URL: https://www.sustainablebusiness toolkit.com/car-wash-technology/?utm_source=copilot.com (дата звернення: 10.04.2026).

11.THE FUTURE OF SUSTAINABILITY IN THE CAR WASH INDUSTRY: веб-сайт. URL: https://www.superiorcarwashsupply.com/blog/future-of-sustainability-in-car-wash-industry?utm_source=copilot.com (дата звернення: 10.04.2026).

12.M J Geca 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2130 012004.

13.Reitynh minimyok vysokoho tysku - TOP 16: veb-sait. URL: <https://storgom.ua/ua/novosti/rejting-minimoek.html> (data zvernennia: 10.04.2026).

14.Hamdi, N., Boumnijel, I., Mosbahi, M. *et al.* Degradation/mineralization of carwash wastewater by coupled process electrocoagulation/electro-Fenton. *Chem. Pap.* (2026). <https://doi.org/10.1007/s11696-026-04780-y>.

15.Thomas, M., Drzewicz, P., Więckol-Ryk, A. *et al.* Effectiveness of potassium ferrate (VI) as a green agent in the treatment and disinfection of carwash wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 29, 8514–8524 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16278-z>.

16.Dadebo, D., Nasr, M., Fujii, M., Ibrahim, M.G. (2022). Coagulation/Flocculation Treatment of Carwash Wastewater Using Natural-Based Material: A Sustainable Development Approach. In: Jeon, HY. (eds) Sustainable Development of Water and Environment. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07500-1_12.

17.Moroz, O., & Aliiev, Ya. (2024). Avtomatyzatsiia standartnykh protsesiv stantsii tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomobiliv za dopomohoiu robotyzovanykh system. [Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho

universytetu imeni V.N. Karazina, seria «Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia»], 63, 60-72. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-63-06>. (in Ukrainian)

18. Carwash Industry Statistics: веб-сайт. URL: https://worldmetrics.org/carwash-industry-statistics/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.04.2026).

Shepelenko I., Shumlyakivskiy V., Krasota M., Osin R., Chervonyi T. Justification for choosing car washing equipment

The aim of this study is to develop an approach to selecting car wash equipment. Based on an analysis of modern car wash technologies and the equipment used in this process, a classification of such equipment according to a number of criteria is proposed. Data on the technical characteristics of various types of car wash equipment are presented. It has been established that the decisive factors in selecting the type of car wash equipment are their technical and operational characteristics, taking into account economic feasibility and modern environmental requirements. The potential for establishing self-service car washes in the city of Kropyvnytskyi is highlighted.

The paper analyses modern car washing technologies and the equipment used in this process, which has enabled a classification of these technologies based on key characteristics. In particular, for different washing methods and technologies, these characteristics include: type of service, washing mechanism, impact on the surface being washed, and working water pressure. Car wash equipment is classified by: degree of specialisation, level of mobility, technical design, vehicle class, construction, operating mode, and method of water heating.

It has been established that the key factors in selecting the type of car wash equipment are technical, operational, economic and environmental indicators. Taking these indicators into account can provide practical guidance when choosing car wash technology and equipment.

Taking into account current trends in the services market, it has been concluded that automated and contactless car wash systems, as well as self-service car washes, have a promising future in Kropyvnytskyi.

Key words: car service company, service services, car washing technologies, car washing equipment, contactless washing systems, self-service car wash

ШЕПЕЛЕНКО Ігор Віталійович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: kntucpfzk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>

ШУМЛЯКІВСЬКИЙ Володимир Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту, Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна, e-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5418-4736>

КРАСОТА Михайло Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: krasotamv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>

ОСІН Руслан Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: ruslan.osin@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8927-5363>

ЧЕРВОНИЙ Тарас Володимирович, аспірант третього року навчання кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: asbdv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0004-2351-3391>

Ihor SHEPELENKO, Doctor of Technical Science, Professor Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: kntucpfzk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>

Volodymyr SHUMLIKIVSKYI, PhD in Engineering, Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering and Automotive Transport, *Zhytomyr Polytechnic State University*, Zhytomyr, Ukraine, e-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5418-4736>

Mykhailo KRASOTA, PhD in Engineering, Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: krasotamv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>

Ruslan OSIN, PhD in Engineering, Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: ruslan_osin@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8927-5363>.

Taras CHERVONYI, a third-year postgraduate student in the Department of Agricultural Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: asbdv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0004-2351-3391>

Дата надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

<https://doi.org/10.36910/d4aq0798>

УДК 629.3.027.5
UDC 629.3.027.5

Стельмахук В.В., Стельмахук С.В.
Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ЗУСИЛЛЯ У ТЯГОВО-ЗЧІПНОМУ ПРИСТРОЇ НА СТІЙКІСТЬ РУХУ МАЛОТОННАЖНОГО АВТОПОЇЗДА У ГАЛЬМІВНОМУ РЕЖИМІ

З кожним роком кількість транспортних засобів, зокрема автомобільних поїздів, на дорогах України зростає, як і їхні швидкості. Гальмування малотоннажного автопоїзда часто ускладнюється додатковими зусиллями у тягово-зчіпному пристрої, які можуть призводити до складання ланок і втрати бічної стійкості. У попередніх дослідженнях показано, що за номінального завантаження автомобіля і причепа та за рівності гальмівних сил на колесах силам зчеплення на швидкості 25 м/с автопоїзд залишається стійким у всьому діапазоні зміни маси причепа; на 30 м/с критична маса причепа знижується до 2500 кг. Проте у тих моделях не враховано двох чинників — асинхронності спрацьовування гальмівних приводів автомобіля і причепа та зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої.

У роботі доопрацьовано плоску модель гальмування малотоннажного автопоїзда з урахуванням обох чинників та проаналізовано перехідний процес за стрибкоподібного гальмування на швидкостях 15 м/с і 25 м/с.

За результатами моделювання встановлено, що протягом перших 0,3 с з початку гальмування нормальні реакції опірної поверхні на осях автомобіля і причепа майже не змінюються — зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої компенсує поздовжнє перерозподілення навантаження. У цьому інтервалі кут складання автопоїзда не перевищує 0,015 рад, а бічне відхилення причепа не виходить за допустиму смугу руху ($S_b = L_p \cdot \tan(0,015) = 0,029$ м). З плином часу кут складання зростає, причеп виходить за допустиму смугу: $S_b = 0,186$ м за $V = 15$ м/с і $S_b = 0,375$ м за $V = 25$ м/с. Коливання причепа поступово затухають, бічна швидкість стабілізується — стійкість автопоїзда відновлюється.

Отже, зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої — істотний чинник у перші 0,3 с гальмування, який слід враховувати при оцінюванні стійкості малотоннажних автопоїздів.

Ключові слова: малотоннажний автопоїзд, гальмування, тягово-зчіпний пристрій, складання ланок, кут складання, бічна стійкість, перерозподілення навантаження, асинхронність гальмівних приводів.

ВСТУП

Кількість автопоїздів на дорогах України зростає щороку, а разом з ними — і швидкості руху, які за нинішніх умов експлуатації нерідко перевищують 25 м/с. Особливість автопоїзда полягає у тому, що у шарнірному з'єднанні його ланок постійно діють додаткові поздовжні зусилля — особливо при гальмуванні, коли причеп набігає на тягач. Саме у цьому режимі автопоїзд найчастіше складається і втрачає бічну стійкість [1].

За критерії стійкості автопоїзда у гальмівному режимі прийнято кутове і лінійне відхилення причіпної ланки від траєкторії тягача. Бічне відхилення причепа не повинне перевищувати ± 3 % від габаритної ширини смуги руху — за межами цього коридору рух уже не вважається стійким.

Найризикованіший режим — екстрене гальмування на максимальному гальмівному зусиллі. Тоді ймовірність блокування коліс та осей зростає, а будь-яка несиметрія завантаження причепа чи нерівномірність гальмівних сил між бортами одразу позначається на стійкості. Зі зростанням початкової швидкості гальмівний шлях видовжується нелінійно, а разом з ним — і ризик складання ланок [2–14].

Попри значний обсяг досліджень за цим напрямом, стійкість автопоїзда за різних експлуатаційних умов гарантувати не вдається. Відкритим лишається питання впливу двох чинників, які у моделях гальмування зазвичай не враховуються — асинхронності спрацьовування гальмівних приводів автомобіля і причепа та зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої. Саме на них зосереджена ця робота.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стійкість руху та, зокрема, бічна стійкість АП викликає серйозне занепокоєння. У порівнянні з односекційним транспортним засобом, наприклад автомобілем, стійкість руху АП зазвичай погіршується через несприятливий вплив причепа на динаміку та кінематику [15]. Встановлено, що для односекційних транспортних засобів порушення стійкості пов'язано з надмірною повороткістю, у той час як автопоїздів характерна динамічна або коливальна нестійкість, в основному через знижене демпфування ризикання системи на високих швидкостях руху [16]. Поведінку автопоїзда у різних режимах руху у роботі [17] запропоновано оцінювати як коефіцієнт посилення бічного

прискорення (RWA), який визначається як відношення максимального пікового бічного прискорення в центрі мас (ЦМ) причепа, поділеного на прискорення ведучого транспортного засобу при маневрі зміни смуги руху. За цим коефіцієнтом автопоїзд більш схильний до нестабільних режимів руху, наприклад, похитування/покачування і складання. Шарнірне з'єднання (наприклад, зчіпка) та підвіска ведучого транспортного засобу ізолюють водія від коливань причепа, тому йому важко відчувати поведінку причепа, оскільки його сприйняття засноване в основному на реакціях ведучого транспортного засобу, а не причепа [18].

За останні чотири десятиліття дослідження бічної стійкості та маневреності значною мірою проводилися для зчленованих великовантажних транспортних засобів (АНВ), а не для автопоїздів у складі легкового автомобіля і причепа [19, 20]. Для таких автопоїздів водії звичайні люди без спеціальної підготовки для водіння зчленованих транспортних засобів. Коли автомобіль буксирує причіп, статична стійкість (тобто характеристики керованості у стійкому стані) можуть змінитися з початкової недостатньої повороткості на надмірну повороткість через додаткове навантаження на зчіпний пристрій, особливо у гальмівному режимі. У роботах [19, 21 та ін.] було проаналізовано вплив швидкості руху, навантаження на зчіпку, маси причепа, моменту інерції причепа, положення його осі, колії коліс та жорсткості шин бічну стійкість автопоїзда на поворотах. При цьому було встановлено, що навіть для автопоїздів з оптимальними параметрами тягового автомобіля і причепа стійкість у різних режимах руху не може бути гарантована, зважаючи на різні умови експлуатації автопоїздів [22]. Тому у подальшому було розширено дослідження інших параметрів, зокрема вплив демпфування у зчіпному пристрої на стабілізацію динамічної нестійкості коливань причепа. На жаль, досягти позитивного вирішення проблеми не вдалося [8]. Іншим досліджуваним параметром було обмеження зусилля на тягово-зчіпний пристрій [15]. Проте і це рішення не виявилось ефективним, оскільки будь-який причіп може бути приєднаний до будь-якого автомобіля під контролем власника, а не під контролем виробника.

Окрім згаданих факторів, не менш вагомим на стійкість автопоїзда у гальмівному режимі є вплив бортової нерівномірності гальмівних сил, зокрема на осях причепа, яка призводить до появи обертового моменту в горизонтальній площині. При дії цього моменту траєкторія руху причепа відхиляється від траєкторії тягового автомобіля, що може призвести до втрати стійкості руху автопоїзда. При цьому навіть антиблокувальна система автомобіля не в змозі запобігти його боковому зміщенню та зміні його курсового кута.

Ряд дослідників [9, 14, 23-25] у якості критерію стійкості автопоїзда при гальмуванні пропонують значення сили в зчіпному пристрої, яке обумовлене набіганням причіпної ланки на автомобіль-тягач. Ця сила призводить до складання ланок автопоїзда і порушення стійкості його руху. При цьому робиться висновок про те, що кут складання ланок автомобільного поїзда напряму залежить від початкової швидкості гальмування, бази причіпної ланки та координат точки зчеплення причіпної ланки та тягача [24]. Тому передбачається, що стійкість і керованість руху АТЗ повинні забезпечуватися конструктивними параметрами самої машини, з тим щоб забезпечити упевненість водія в реалізації режиму руху, що задається, виключити мимовільне виникнення небезпечного відхилення від нього і зберегти можливість швидкого коректування з подальшою стабілізацією того ж режиму [13].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є дослідження впливу зусиль стиску в тягово-зчіпному пристрої на показники стійкості автопоїзда у гальмівному режимі. Для досягнення мети досліджень сформульовані задачі дослідження:

- доопрацювати математичну модель малотоннажного автопоїзда у гальмівному режимі шляхом введення у вихідну систему рівнянь зусилля у тягово-зчіпному пристрої;
- визначити загальну гальмівну силу і уповільнення автопоїзда з урахуванням коефіцієнта асинхронності;
- визначити нормальні реакції опірної поверхні на осі автопоїзда у процесі гальмування з урахуванням коефіцієнта асинхронності;
- визначити показники стійкості автопоїзда у гальмівному режимі з урахуванням коефіцієнта асинхронності.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглядається автопоїзд у складі легкового автомобіля Mercedes-Benz T1N “Sprinter” і причепа ПВБФ 15, рис. 1 [26], оснащеного гальмівною системою – гальмо на кату, рис. 2.

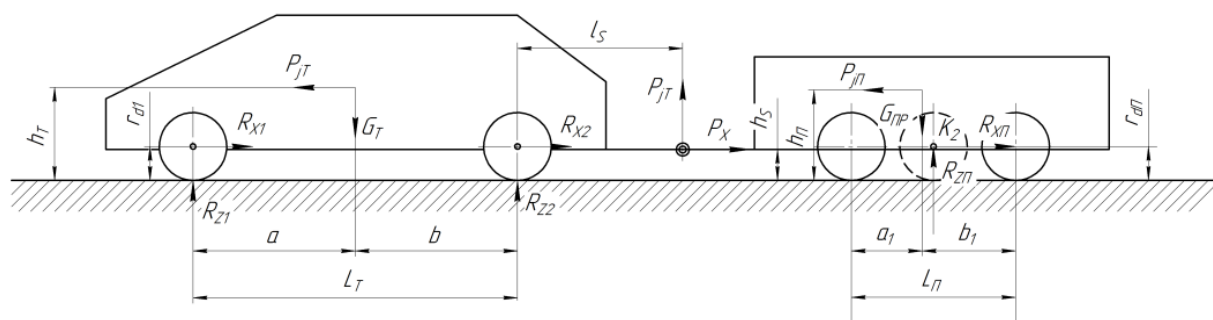


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на автопоїзд при гальмуванні

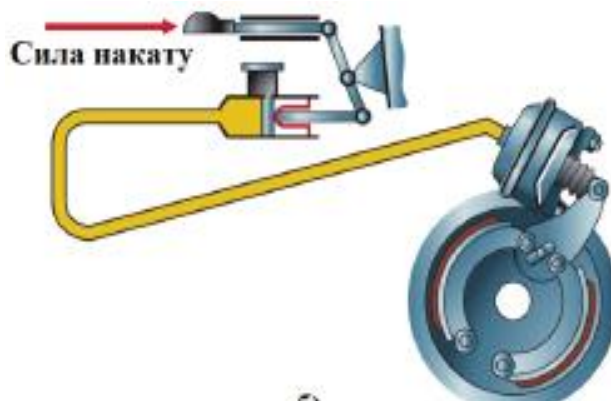


Рисунок 2 – Схема і принцип роботи гальмівних систем причепів з інерційно-гідравлічним приводом [27]

До гальмівних систем автопоїздів пред'являються вимоги сумісності їх ланок і припустимої асинхронності часу спрацювання гальмівних приводів ланок. Сумісність ланок автопоїзда оцінюється коефіцієнтом сумісності [27]

$$K_c = \frac{\gamma_{np}}{\gamma_T}, \quad (1)$$

де $\gamma_T = \frac{M_{та}}{m_T}$; $\gamma_{np} = \frac{M_{сп}}{m_{np}}$ - питомі гальмівні сили на осях автомобіля і причепа;

$M_{та}$, $M_{сп}$ - сумарні гальмівні моменти на колесах автомобіля і причепа;

m_T , m_{np} - маса автомобіля і причепа

Оскільки у подальшому розглядаються сумарні гальмівні сили на осях причепа, до двовісний причіп зведений до одновісного з параметрами двовісного. Асинхронність часу спрацювання Δt гальмівного приводу тягача $\Delta t_{спра}$ й причепа $\Delta t_{спрп}$ визначається за формулою

$$\Delta t = |t_{спра} - t_{спрп}|. \quad (2)$$

Значення K_c повинне бути не менше 0,9, а Δt - не більше 0,3 с.

При цьому основне гальмівне зусилля створюється автомобілем, а причіп накочується на автомобіль, створюючи зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої, що призводить як до зміни нормальних реакцій опорної поверхні на колеса автопоїзда, так і зміни уповільнення автопоїзда.

За умови, що гальмівні сили на колесах автомобіля при екстремому гальмуванні досягли свого максимального значення, що дорівнює силі зчеплення, а на колесах причепа ще дорівнюють нулю (коефіцієнт асинхронності $K_c = 0,3$ с) і зростають за лінійним законом за час зростання зусилля у приводі загальна гальмівна сила автопоїзда визначиться як

$$P_{ca} = g(\varphi_3 \times G_a + G_n \times k \times \varphi), \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що враховує збільшення гальмівної сили за час зростання гальмівного зусилля на колесах причепа.

При цьому уповільнення автопоїзда j_{an} і зусилля стиску P_c в тягово-зчіпному пристрої визначаються як

$$j_{an}(t) = \frac{G_a \times \varphi_3 + G_n j_n(t)}{G_{an}}, \quad (6)$$

$$P_{cx} = G_n \times j_{an}, \quad (7)$$

де G_a , G_n , G_{an} – маса автомобіля, причепа, автопоїзда;

P_{cx} , P_{cz} – зусилля стиску та навантаження на тягово-зчіпний пристрій.

На рис. 3 наведена зміна гальмівної сили, сили стиску в тягово-зчіпному пристрої і уповільнення автопоїзда, що розглядається, в залежності від часу гальмування причепа.

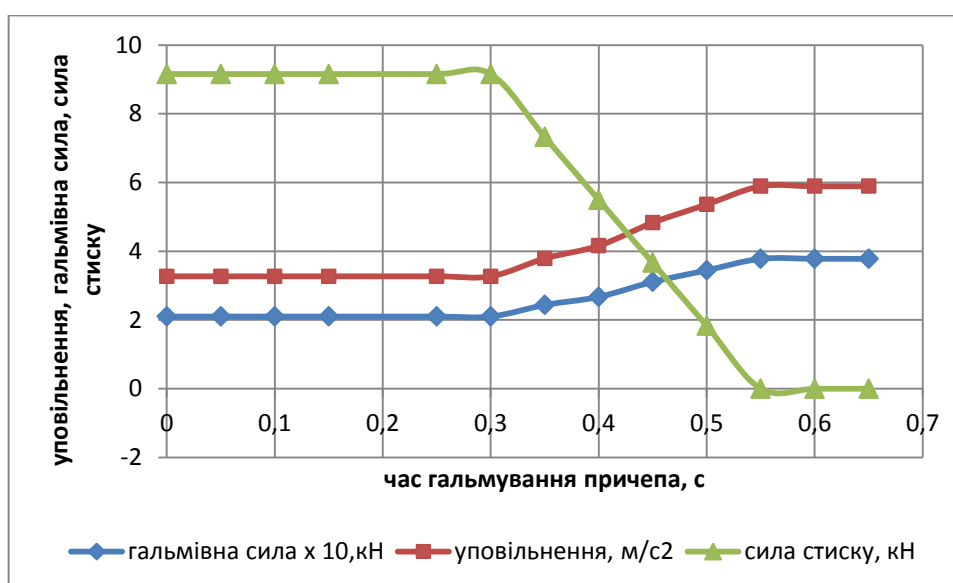


Рисунок 3 – Зміна уповільнення, гальмівної сили автопоїзда і зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої в залежності від часу гальмування причепа

Як слідує з наведеного графіка протягом 0,3 с у тягово-зчіпному пристрої діють максимальні зусилля стиску P_c , які з плином часу зменшуються. Ці зусилля призводять до зміни нормальних реакцій опірної поверхні на колесах автомобіля і причепа, які визначаються як [26]:

- для здвоєної осі причепа

$$Z_n = G_n \left(\frac{a_n}{L_n} - \frac{j_{an} h_{gn}}{g L_n} \right) - P_{cx} \frac{h_c}{L_n}; \quad (8)$$

для передньої осі автомобіля

$$Z_{1a} = G_a \left(\frac{b}{L_a} + \frac{j_{an} h_{ga}}{g L_a} \right) - P_{cz} \frac{a + c}{L_a}. \quad (9)$$

- для задньої осі автомобіля

$$Z_{2a} = G_a \left(\frac{a}{L_a} - \frac{j_{an} h_{ga}}{gL_a} \right) + P_{cz} \frac{a+c}{L_a}, \quad (10)$$

L_a, L_n – база автомобіля і причепа;

$j_{\tau}, j_{\tau a}, j_{\tau n}$ – сповільнення автопоїзда, автомобіля і причепа;

P_{cx} – зусилля в тягово-зчіпному пристрої, $P_{cx} = (j_{an} - j_n) \times G_n$;

P_{cz} – навантаження на тягово-зчіпний пристрій, $P_{cz} = P_{cx} \times \frac{h_c}{L_n}$;

h_c – висота розташування тягово-зчіпного пристрою, $h_c = 0,4$ м;

h_{gn} – висота центру мас причепа, $h_{gn} = 0,48$ м;

h_{ga} – висота центру мас автомобіля, $h_{ga} = 0,55$ м;

L_a – база автомобіля, $L_a = 3,55$ м;

L_n – база причепа, $L_n = 1,95$ м;

a – відстань від центру мас автомобіля до передньої осі, $a = 1,90$ м;

c – відстань від центру мас автомобіля до точки зчипки з причепом, $c = 2,45$ м.

На рис. 4 наведена зміна реакцій опорної поверхні на осях автомобіля і причепа автомобільного поїзда, що розглядається, у часі перехідного процесу, коли гальмівна сила на осі причепа збільшується від нуля до свого максимального значення, рис. 2.

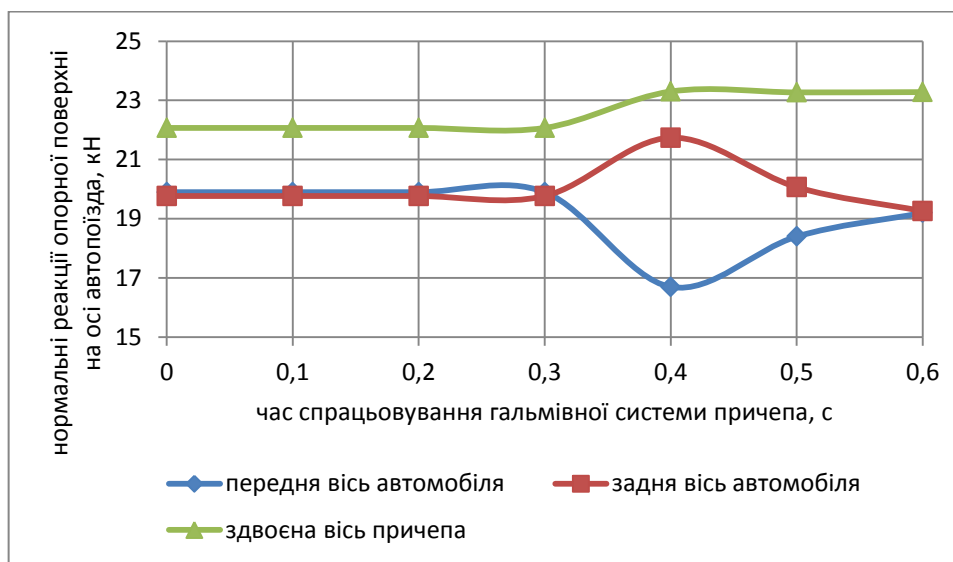


Рисунок 4 – Зміна реакцій опорної поверхні на осі автопоїзда при екстремумі гальмуванні

Аналіз даних, рис. 4, показує, що протягом 0,3 с нормальні реакції опорної поверхні на осях автомобіля майже не змінюються. Пояснюється дією зусилля у тягово-зчіпному пристрої. Це зусилля довантажує задню вісь автомобіля і компенсує його зменшення за рахунок дії сили інерції в центрі мас автомобіля.

Для причепа протягом 0,3 с нормальна реакція опорної поверхні на його здвоєну вісь залишається майже незмінною, потім протягом 0,1 с зростає, досягає свого максимуму і далі залишається незмінною.

Такий характер зміни нормальних реакцій опорної поверхні на осі автомобіля і причепа, а відповідно і гальмівних сил призводить до того, що на шляху, що проходить автопоїзд за 0,3 с, стійкість автопоїзда може бути порушена дією зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої.

Аналіз досліджень стійкості руху автомобільних поїздів в гальмівному режимі показав, що узагальнюючим параметром, що характеризує стійкість автопоїзда, можна прийняти початкову швидкість руху V_0 , за якої автомобіль і причіп не виходять за межі ширини смуги руху. На величину цього параметру впливають конструктивні і експлуатаційні параметри автопоїзда і умови його експлуатації. Визначення цього параметра у прямолінійному русі базується на диференціальних рівняннях руху автопоїзда у гальмівному режимі. Ці рівняння записані у вигляді [27]:

$$\begin{aligned}
& m\dot{v} + m\omega u - X_2 - m_1\dot{v} - Y_1 \sin \theta - X_1 \cos \theta - m_1 \sin \theta \lambda \dot{\omega} - m_1 \sin \theta \lambda \ddot{\theta} + m_1 u \omega + m_1 a \omega^2 - \\
& - m_1 \cos \theta \lambda \omega^2 - m_1 \cos \theta \lambda \dot{\theta}^2 - 2m_1 \cos \theta \omega \lambda \dot{\theta} - m_2 \dot{v} + X_3 \cos \varphi + Y_3 \sin \varphi - m_2 d_1 \omega^2 \cos \varphi - \\
& - m_2 d_1 \dot{\varphi}^2 + m_2 d_1 \dot{\omega} \sin \varphi - m_2 d_1 \ddot{\varphi} \sin \varphi + m_2 u \omega - m_2 c \omega^2 + 2m_2 d_1 \omega \dot{\varphi} \cos \varphi + P_c \times \cos \varphi = 0 \\
& - m(\dot{u} + \omega v) + Y_1 \cos \theta - X_1 \sin \theta + X_3 \sin \varphi + Y_3 \cos \varphi - 2m_1 \sin \theta \lambda \omega \dot{\theta} - 2m_2 d_1 \omega \dot{\varphi} \sin \varphi + \\
& + m_2 d_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi + m_2 d_1 \dot{\omega} \cos \varphi - m_2 d_1 \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_1 \dot{u} + m_1 \cos \theta \lambda \dot{\theta} + m_1 \gamma \ddot{\varphi} \cos \theta - m_1 \omega^2 \lambda \sin \theta - \\
& - m_1 \sin \theta \lambda \dot{\theta}^2 + m_2 d_1 \omega^2 \sin \varphi + Y_2 - m_2 \dot{u} + m_2 c \dot{\omega} - m_1 a \dot{\omega} - m_1 \omega v - m_2 \omega v + P_c \times \sin \varphi = 0 \\
& cm_2 \omega v - bY_2 + h_1 \dot{\theta} - J \dot{\omega} + Y_1 a \cos \theta - X_1 a \sin \theta + 2cm_2 d_1 \omega \dot{\varphi} \sin \varphi - 2m_1 a \lambda \omega \dot{\theta} \sin \theta - M_{tr} + P_c \times \sin \varphi \times c + \\
& + m_2 cd_1 \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 cd_1 \omega^2 \sin \varphi - m_2 cd_1 \dot{\omega} \cos \varphi + m_1 a \lambda \ddot{\theta} \cos \theta - m_1 a \lambda \dot{\theta}^2 \sin \theta + m_1 a \lambda \dot{\omega} \cos \theta - m_1 a \lambda \omega^2 \sin \theta + \\
& + X_3 d_1 \sin \varphi - m_2 c^2 \dot{\omega} - m_1 a^2 \dot{\omega} - m_1 a \omega v - Y_3 d_1 \cos \varphi + m_2 c \dot{u} - m_1 a \dot{u} - m_2 cd_1 \ddot{\varphi} \sin \varphi = 0 \\
& - J_1 (\dot{\omega} + \ddot{\theta}) - \lambda [m_1 \dot{u} \cos \theta + m_1 \dot{v} \sin \theta + m_1 \lambda \ddot{\theta} + m_1 \lambda \dot{\omega} + Y_1 - m_1 \omega u \sin \theta - m_1 a \omega^2 \sin \theta - \\
& - m_1 a \varphi \cos \theta - m_1 \omega v \cos \theta] = 0 \\
& - J_2 (\dot{\omega} + \ddot{\varphi}) - Y_3 L_1 + P_c \times \sin \varphi \times d_1 + m_2 d_1 \dot{u} \cos \varphi + m_2 d_1 \omega v \cos \varphi + m_2 d_1 \dot{v} \sin \varphi - \\
& - m_2 d_1 \omega u \sin \varphi - m_2 d_1^2 \dot{\omega} \cos \varphi + m_2 cd_1 \omega^2 \sin \varphi = 0
\end{aligned} \tag{3}$$

У системі рівнянь (3) прийняті такі позначення:

m, m_1, m_2, I, I_1, I_2 - відповідно маса і момент інерції автомобіля, керуючого колісного модуля автомобіля і причепа щодо вертикальної осі, що проходить через центр мас;

u, v, ω - бічна, поздовжня і кутова швидкість центра мас автомобіля;

$X_i, Y_i (i=1,2,3)$ - поздовжня і бічна сила на колесах автомобіля і причепа;

P_c - сила в тягово-зчіпному пристрої;

θ - кут повороту керованих коліс автомобіля;

φ - кут складання ланок автопоїзда;

a, b - відстань від центра мас автомобіля до передньої і задньої осі автомобіля;

d_1 - відстань від центра мас причепа до точки зчіпки автомобіля з причепом;

c - відстань від центра мас автомобіля до точки зчіпки з причепом;

λ - зміщення осі шворня керованих коліс автомобіля у поздовжній площині

Отримана система п'яти диференціальних рівнянь може бути використана для знаходження невідомих – $v, u, \omega, \varphi, \dot{\varphi}$ у процесі гальмування.

У систему рівнянь (3) входять поздовжні і бокові реакції дороги на колеса окремих ланок автомобіля, які у значній мірі залежать від нормальних реакцій опорної поверхні. Бічні реакції Y_i залежать від прийнятої моделі деформації колеса у бічному напрямку. Величина і напрямок поздовжніх реакцій X_i залежать від режиму руху автопоїзда (розгін, усталений вільний рух, гальмування).

Поздовжні реакції, що діють на колеса осей автопоїзда у гальмівному режимі, визначені як [26]:

$$X_i = \varphi_z \times Z_i, \tag{4}$$

де φ_z - коефіцієнт зчеплення;

Z_i - нормальна реакція опорної поверхні на осі автомобіля і причепа.

Отримані значення нормальних реакцій опорної поверхні на колесах осей автопоїзда будуть використані при визначенні поздовжніх і бічних сил, що діють на автомобіль і причіп.

При визначенні бічних реакцій у більшості випадків використовують залежності Д.А.Антонова і аксіоматика І.Рокара [28]. Залежності Д.А.Антонова описують весь спектр факторів, що впливають на бічну силу і бічне відведення колеса, проте вимагають значної кількості емпіричних коефіцієнтів, що утруднює їх використання. Тому скористаємося залежністю І.Рокара.

Якщо крива залежності бічної реакції від кута бічного відведення $Y = f(\delta)$ при будь-якому значенні кута відведення $\forall \delta > 0$ опукла, то цьому випадку відповідають такі можливі аналітичні апроксимації [ман_моно]

$$Y = k_0 \operatorname{arctg}(c_0 \delta), \quad Y = k_0 th(c_0 \delta), \quad Y = \frac{k\delta}{\sqrt{1 + \chi^2 \delta^2}}. \quad (11)$$

Загальна вимога до всіх функцій наведених у формулі (11) полягає в тому, що функція $f(\delta)$ є сумою знакоперемінного ряду

$$Y = k\delta - k'\delta^3 + k''\delta^5 - + \dots \quad (12)$$

У наведених формулах [ман_моно]:

k – коефіцієнт опору відведення;

δ – кут відведення;

c_0 – коефіцієнт пропорційності,

$\chi = \frac{k}{Y^*}$, Y^* – максимальна, можлива до реалізації бічна сила на осі автомобіля і причепа;

$$Y_i^* = Z_i \times \varphi_{ib};$$

Z_i – нормальна реакція опорної поверхні на i -вісь автомобіля і причепа;

φ_{ib} – коефіцієнт зчеплення коліс i -ої осі автопоїзда у бічному напрямку (прийнято рівним для усіх осей $\varphi_{ib}=0,6$).

Приймемо останню з апроксимацій (8). Тоді для реакції на i -ій осі Y_i отримаємо

$$Y_i = \frac{k_i \delta_i}{\sqrt{1 + \chi_i^2 \delta_i^2}} \quad (13)$$

Дана закономірність правомірна для визначення бічних сил і показників стійкості автопоїзда у вільному режимі. Відповідно кути відведення визначаються як

$$\delta_1 = \theta - \operatorname{arctg} \frac{u + \omega(a - c \cdot \cos \theta) - c \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta}{v + c(\omega + \dot{\theta}) \sin \theta};$$

$$\delta_2 = \operatorname{arctg} \frac{-u + b_{21} \cdot \omega}{v};$$

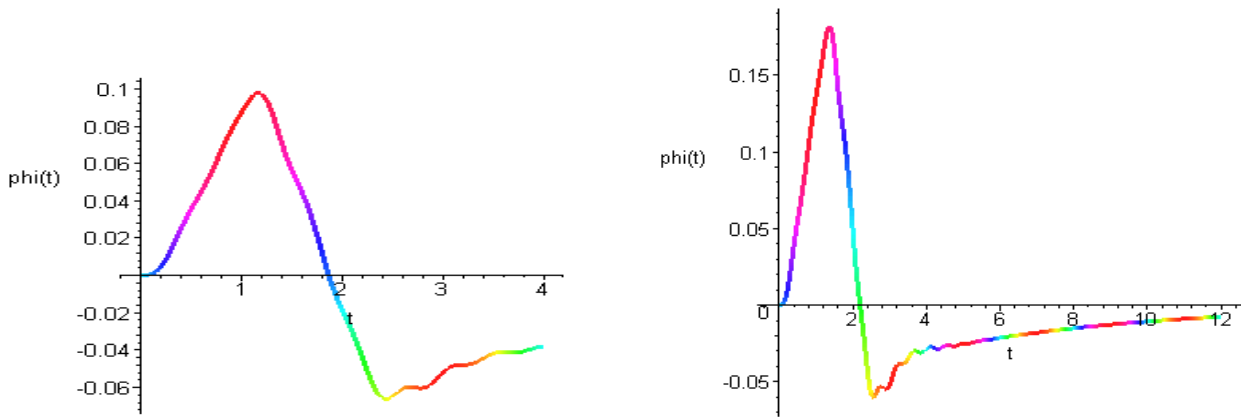
$$\delta_3 = -\operatorname{arctg} \frac{v \sin \phi + (u - \omega d_1) \cos \phi - \omega_1 d_1}{v \cos \phi - (u - \omega d_1) \sin \phi} \quad (14)$$

Інтегрування системи рівнянь (3) виконано за вихідних даних, наведених у [27]:

$m=3500$; $m_1=150$; $m_2=2800$; $I_y=1987,5$; $I_{y1}=87,1$; $I_{y2}=978,2$; $a=1,90$; $b=1,65$; $c=2,45$; $d_1=1,95$; $h=0,58$; $h_c=0,40$; $\lambda=0,015$.

Початковими умовами інтегрування прийнято: $v_a=15,25$ м/с; $\varphi_3=0,6$; $\theta=0$; $\dot{\theta}=0$

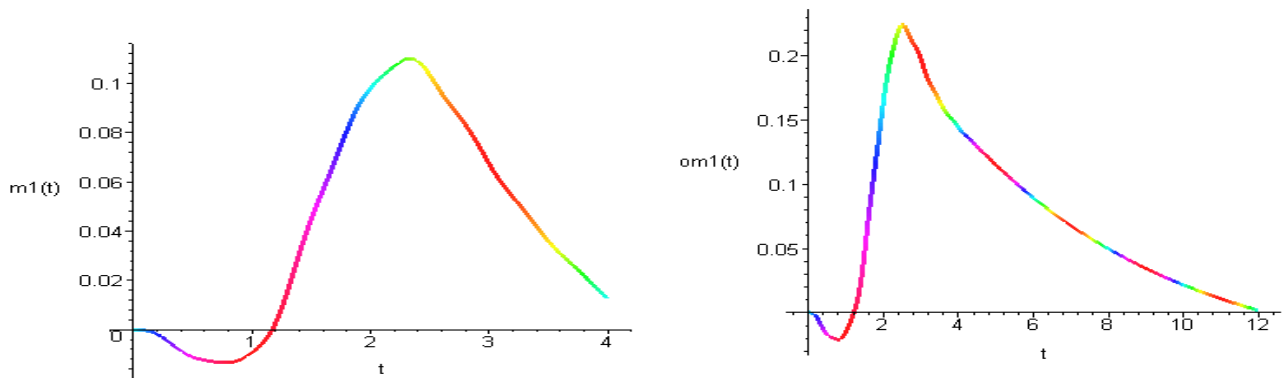
На рис 5-7 наведено графіки зміни кута складання автопоїзда, рис.5, кутової швидкості автомобіля $\omega(t)$ і кутової швидкості причепа $\omega_1(t)$, рис.6, за швидкості 15 м/с і 25 м/с, а також графік зміни швидкості кута складання автопоїзда і бічної швидкості причепа за швидкості 15 м/с, рис.7.



а)

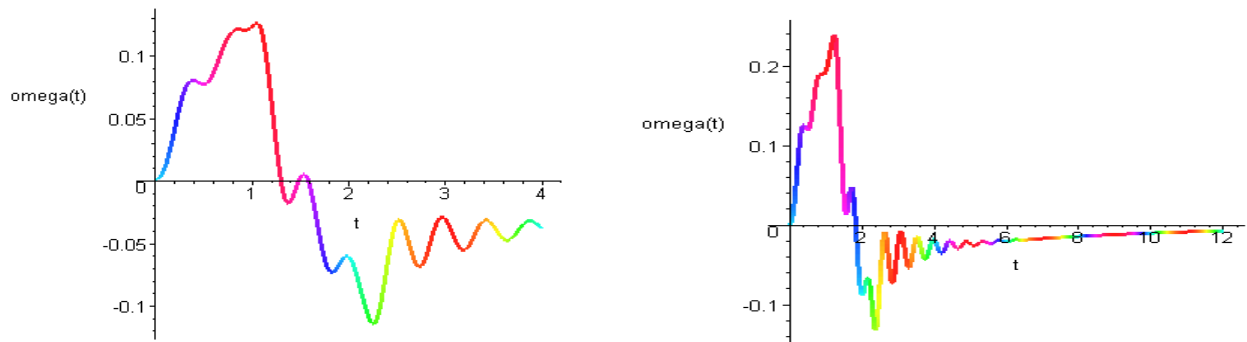
б)

Рисунок 5 – Зміна кута складання автопоїзда у функції часу перехідного процесу за швидкості 15 м/с (а) і 25 м/с (б)



а)

б)



в)

г)

Рисунок 6 – Зміна кутової швидкості автомобіля $\omega(t)$ і кутової швидкості причепа $om1(t)$ у функції часу перехідного процесу за швидкості 15 м/с (а, в) і 25 м/с (б, г)

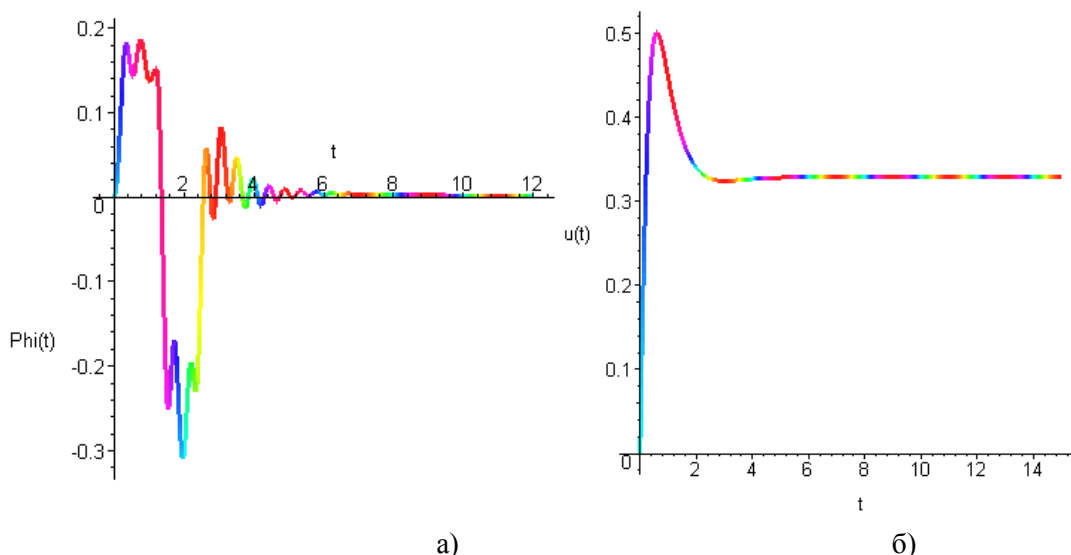


Рисунок 7 – Зміна швидкості кута складання автопоїзда (а) і бічної швидкості причепа (б) у функції часу перехідного процесу за швидкості 15 м/с

Аналіз графіків зміни кута складання як за швидкості 15 м/с, так і швидкості 25 м/с показує, що протягом 0,3 с кут складання автопоїзда не перевищує 0,015 рад і причеп не виходить за допустиму смугу руху ($S_6=L_n \times \text{tg}0,015=0,02925$ м), проте з плином часу кут складання автопоїзда збільшується, причеп виходить за допустиму смугу руху ($S_{615}=0,186$ м і $S_{625}=0,375$ м). Разом з тим, коливальний процес причепа має затухаючий характер, рис. 6 в,г, рис. 7а, і бічна швидкість, рис. 7б, з плином часу стабілізуються, що свідчить про поліпшення стійкості руху автопоїзда.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Стійкість руху та, зокрема, бічна стійкість автопоїзда викликає серйозне занепокоєння. У порівнянні з односекційним транспортним засобом, наприклад автомобілем, стійкість руху автопоїзда зазвичай погіршується через несприятливий вплив причепа на динаміку та кінематику автопоїзда. Проведеними раніше дослідженнями встановлено, що за номінального навантаження автомобіля і причепа і рівності гальмівних сил на їх колесах силам зчеплення за швидкості 25 м/с автопоїзд залишається стійким у всьому діапазоні зміни загальної маси причепа, у той час як за швидкості 30 м/с критичною залишається маса причепа на рівні 2500 кг. При цьому не враховувалося асинхронність часу спрацювання гальмівних систем автомобіля і причепа, а також вплив зусилля стискання у тягово-зчіпному пристрої на стійкість автопоїзда в процесі гальмування. У результаті проведеного дослідження показано, що протягом 0,3 с з початку гальмування нормальні реакції опорної поверхні на осях автомобіля майже не змінюються. Пояснюється дією зусилля у тягово-зчіпному пристрої. Це зусилля довантажує задню вісь автомобіля і компенсує його зменшення за рахунок дії сили інерції в центрі мас автомобіля. Поряд з автомобілем для причепа протягом 0,3 с нормальна реакція опорної поверхні на його здвоєну вісь залишається майже незмінною, потім протягом 0,1 с зростає, досягає свого максимуму і далі залишається незмінною. Такий характер зміни нормальних реакцій опорної поверхні на осі автомобіля і причепа, а відповідно і гальмівних сил призводить до того, що на шляху, що проходить автопоїзд за 0,3 с, стійкість автопоїзда може бути порушена дією зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої, що у подальшому було і доведено результатами моделювання гальмівного режиму автопоїзда. Аналіз графіків зміни кута складання як за швидкості 15 м/с, так і швидкості 25 м/с показує, що протягом 0,3 с кут складання автопоїзда не перевищує 0,015 рад і причеп не виходить за допустиму смугу руху ($S_6=L_n \times \text{tg}0,015=0,02925$ м), проте з плином часу кут складання автопоїзда збільшується, причеп виходить за допустиму смугу руху ($S_{615}=0,186$ м і $S_{625}=0,375$ м). Разом з тим, коливальний процес причепа має затухаючий характер і бічна швидкість, з плином часу стабілізуються, що свідчить про поліпшення стійкості руху автопоїзда.

ВИСНОВКИ

1. Доопрацьована математична модель малотоннажного автопоїзда у гальмівному режимі шляхом введення у вихідну систему рівнянь зусилля у тягово-зчіпному пристрої.
2. Визначені загальна гальмівна сила і уповільнення автопоїзда з урахуванням коефіцієнта

асинхронності. При цьому встановлено, що протягом 0,3 с з початку гальмування нормальні реакції опорної поверхні на осях автомобіля майже не змінюються. Пояснюється дією зусилля у тягово-зчіпному пристрої. Це зусилля довантажує задню вісь автомобіля і компенсує його зменшення за рахунок дії сили інерції в центрі мас автомобіля.

3. Показано, що для причепа протягом 0,3 с нормальна реакція опорної поверхні на його здвоєну вісь залишається майже незмінною, потім протягом 0,1 с зростає, досягає свого максимуму і далі залишається незмінною. Такий характер зміни нормальних реакцій опорної поверхні на осі автомобіля і причепа, а відповідно і гальмівних сил призводить до того, що на шляху, що проходить автопоїзд за 0,3 с, стійкість автопоїзда може бути порушена дією зусилля стиску у тягово-зчіпному пристрої.

4. Встановлено, що за швидкості 25 м/с протягом 0,3 с кут складання автопоїзда не перевищує 0,015 рад і причеп не виходить за допустиму смугу руху ($S_6=L_n \times \tan 0,015 = 0,02925$ м), проте з плином часу кут складання автопоїзда збільшується, причеп виходить за допустиму смугу руху ($S_{615}=0,186$ м і $S_{625}=0,375$ м). Разом з тим, коливальний процес причепа має затухаючий характер і бічна швидкість з плином часу стабілізується, що свідчить про поліпшення стійкості руху автопоїзда.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сахно В. П., Поляков В. М., Яценко Д. М., Попелиш Д. М. До питання щодо гальмування шарнірно-зчленованих автобусів. Автошляховик України. 2021. № 2. С. 10–17.
2. Поляков В. М., Приходченко Д. Ю., Абрамов Д. А. Теоретичне дослідження впливу осьової нерівномірності гальмівних сил на стійкість автопоїзда. Вісник СХУ імені Володимира Даля. Луганськ : ВНТУ, 2007. № 6 (112). С. 59–62.
3. Shastry P., El-Gindy M., Nguyen N. Pickup Truck and Trailer Gross Vehicle Weight Study. SAE Technical Paper. 2019. № 2019-01-1109.
4. Kroll K. Auto/Trailer Combinations: Their Potential and Problems. SAE Technical Paper. 1971. № 710359.
5. Kang X., Deng W. Vehicle-trailer Handling Dynamics and Stability Control – an Engineering Review. SAE Technical Paper. 2007. № 2007-01-0822.
6. He Y., Islam M. M., Zhu S., Hu T. A design synthesis framework for directional performance optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with trailer lateral dynamic control systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2017. Vol. 231, No. 8. P. 1096–1125.
7. Palkovics L., Fries A. Intelligent electronic systems in commercial vehicles for enhanced traffic safety. Vehicle System Dynamics. 2001. Vol. 35, Nos. 4–5. P. 227–289.
8. Winkler C. B. Rollover of heavy commercial vehicles. UMTRI Research Review. 2000. Vol. 31. P. 1–17.
9. Fancher P. S., Winkler C. B. Directional performance issues in evaluation and design of articulated heavy vehicles. Vehicle System Dynamics. 2007. Vol. 45, Nos. 7–8. P. 607–647.
10. Kharrazi S., Lidberg M., Fredriksson J. A generic controller for improving lateral performance of heavy vehicle combinations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2013. Vol. 227, No. 5. P. 619–642.
11. He Y., Islam M. M. An automated design method for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles. ASME Journal of Mechanical Design. 2012. Vol. 134, № 041002. P. 1–15.
12. Гандзюк М. О., Гандзюк Д. М. Фактори, що впливають на стійкість руху автомобілів і автопоїздів у гальмівному режимі та критерії її оцінки. Сучасні технології в машинобудуванні і на транспорті. 2020. № 2 (15). С. 5–10.
13. Kudarauskas N. Analysis of emergency braking of a vehicle. Transport. 2007. Vol. 22, No. 3. P. 154–159. DOI: 10.1080/16484142.2007.9638118.
14. Гандзюк М. О., Гандзюк Д. М. Особливості моделювання динамічної взаємодії ланок малотоннажного автопоїзда при розгоні та русі по нерівній дорозі. Сучасні технології в машинобудуванні і на транспорті. 2022. № 2 (19). С. 54–62.
15. Li H., Jin H. Research on Personalized AEB Strategies Based on Self-Supervised Contrastive Learning. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2024. Vol. 25. P. 1303–1316.
16. Park M.-K., Lee S.-Y., Kwon C.-K., Kim S.-W. Design of Pedestrian target selection with Funnel Map for Pedestrian AEB System. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. P. 3597–3609.

17. Youshiha H., Awano S., Nagai M., Kamada T. Target Following Brake Control for Collision Avoidance Assist of Active Interface Vehicle. SICE-ICASE International Joint Conference : proceedings, Busan, Republic of Korea, 18–26 Oct. 2006. P. 4436–4439.
18. Liu Z., Cheng S., Wang S. Control Strategy of Automatic Emergency Braking System under Complex Road Conditions. Chinese Science and Technology Papers. 2022. Vol. 17. P. 221–227.
19. Guo L., Sun D. C., Ge P. S. Automatic Emergency Braking Model with Second-Order Collision Time under Complex Conditions. Machinery Design and Manufacture. 2022. Vol. 375. P. 127–131.
20. Gounis K., Bassiliades N. Intelligent momentary assisted control for autonomous emergency braking. Simulation Modelling Practice and Theory. 2022. Vol. 115. Article 102450.
21. Luo Q., Xu L. H. Research on Establishment and Simulation of Following Model Based on Minimum Safety Distance. Science Technology and Engineering. 2010. Vol. 10. P. 569–573.
22. Guan Y. Y. Research on Longitudinal Collision Warning and Automatic Emergency Braking Controller of Electric Vehicle : Ph.D. Thesis / Beijing Jiaotong University. Beijing, 2018.
23. Кузнєцов Р. М., Данилюк Р. Л. До питання стійкості сидельно-причіпного автопоїзда у гальмівному режимі. Наукові нотатки : міжвуз. зб. Луцьк : Вид-во ЛНТУ, 2011. Вип. 32. С. 197–199.
24. Кравчук П. М., Гришук О. К., Бабін Ю. В. Стійкість руху автопоїзда в режимі гальмування. Автошляховик України. 2008. С. 10–11.
25. Динаміка гальмування та теорія робочих процесів гальмівних систем колісних тракторів та тракторних поїздів : колект. монографія : у 3 т. / М. А. Подригало, О. С. Полянський, Д. В. Абрамов та ін. Харків : Естет Принт, 2023. Т. 3. 164 с. ISBN 978-617-95214-5-4.
26. До аналізу процесу гальмування автомобіля з причепом категорії О2 / В. Сахно, В. Онищук, В. Босенко, С. Стельмашук. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. № 2 (25). С. 254–265.
27. До визначення стійкості руху автомобіля з причепом категорії О2 у гальмівному режимі / В. Сахно, І. Мурований, В. Онищук, С. Стельмашук, М. Вінцюк. Сучасні проблеми в машинобудуванні і на транспорті. 2024. № 1 (22). С. 96–306.
28. Шарнірно-зчленовані автобуси. Маневреність та стійкість : монографія / В. П. Сахно та ін. Луцьк : IBV Луцького НТУ, 2021. 288 с.

REFERENCES

1. Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Yashchenko, D. M., & Popelysh, D. M. (2021). Do pytannia shchodo halmuvannia sharnirno-zchlenovanykh avtobusiv [On the issue of braking of articulated buses]. *Avtoshliakhovik Ukrainy*, 2, 10–17.
2. Poliakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Abramov, D. A. (2007). Teoretychne doslidzhennia vplyvu osovoi nerivnomirnosti halmivnykh syl na stiikist avtopoizda [Theoretical study of the influence of axial unevenness of braking forces on the stability of a road train]. *Visnyk SNU imeni Volodymyra Dalia*, 6(112), 59–62.
3. Shastry, P., El-Gindy, M., & Nguyen, N. (2019). Pickup truck and trailer gross vehicle weight study (SAE Technical Paper No. 2019-01-1109). SAE International.
4. Kroll, K. (1971). Auto/trailer combinations: Their potential and problems (SAE Technical Paper No. 710359). SAE International.
5. Kang, X., & Deng, W. (2007). Vehicle-trailer handling dynamics and stability control – An engineering review (SAE Technical Paper No. 2007-01-0822). SAE International.
6. He, Y., Islam, M. M., Zhu, S., & Hu, T. (2017). A design synthesis framework for directional performance optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with trailer lateral dynamic control systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231(8), 1096–1125.
7. Palkovics, L., & Fries, A. (2001). Intelligent electronic systems in commercial vehicles for enhanced traffic safety. *Vehicle System Dynamics*, 35(4–5), 227–289.
8. Winkler, C. B. (2000). Rollover of heavy commercial vehicles. *UMTRI Research Review*, 31, 1–17.
9. Fancher, P. S., & Winkler, C. B. (2007). Directional performance issues in evaluation and design of articulated heavy vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 45(7–8), 607–647.
10. Kharrazi, S., Lidberg, M., & Fredriksson, J. (2013). A generic controller for improving lateral performance of heavy vehicle combinations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 619–642.

11. He, Y., & Islam, M. M. (2012). An automated design method for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles. *ASME Journal of Mechanical Design*, 134(4), 041002.
12. Handziuk, M. O., & Handziuk, D. M. (2020). Faktory, shcho vplyvaiut na stiikist rukhu avtomobiliv i avtopoizdiv u halmivnomu rezhymi ta kryterii yii otsinky [Factors influencing the stability of motion of vehicles and road trains in braking mode and criteria for its evaluation]. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni i na Transporti*, 2(15), 5–10.
13. Kudarauskas, N. (2007). Analysis of emergency braking of a vehicle. *Transport*, 22(3), 154–159. <https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638118>
14. Handziuk, M. O., & Handziuk, D. M. (2022). Osoblyvosti modeliuvannia dynamichnoi vzaiemodii lanok malotonnazhnoho avtopoizda pry rozghoni ta rusi po nerivnii dorozhi [Features of modeling the dynamic interaction of links of a light-duty road train during acceleration and movement on uneven roads]. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni i na Transporti*, 2(19), 54–62.
15. Li, H., & Jin, H. (2024). Research on personalized AEB strategies based on self-supervised contrastive learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25, 1303–1316.
16. Park, M.-K., Lee, S.-Y., Kwon, C.-K., & Kim, S.-W. (2017). Design of pedestrian target selection with funnel map for pedestrian AEB system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66, 3597–3609.
17. Youshiha, H., Awano, S., Nagai, M., & Kamada, T. (2006). Target following brake control for collision avoidance assist of active interface vehicle. In *Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference* (pp. 4436–4439). Busan, Republic of Korea.
18. Liu, Z., Cheng, S., & Wang, S. (2022). Control strategy of automatic emergency braking system under complex road conditions. *Chinese Science and Technology Papers*, 17, 221–227.
19. Guo, L., Sun, D. C., & Ge, P. S. (2022). Automatic emergency braking model with second-order collision time under complex conditions. *Machinery Design and Manufacture*, 375, 127–131.
20. Gounis, K., & Bassiliades, N. (2022). Intelligent momentary assisted control for autonomous emergency braking. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 115, 102450.
21. Luo, Q., & Xu, L. H. (2010). Research on establishment and simulation of following model based on minimum safety distance. *Science Technology and Engineering*, 10, 569–573.
22. Guan, Y. Y. (2018). Research on longitudinal collision warning and automatic emergency braking controller of electric vehicle (Doctoral dissertation). Beijing Jiaotong University, Beijing, China.
23. Kuznietsov, R. M., & Danyliuk, R. L. (2011). Do pytannia stiikosti sidelno-prychipnoho avtopoizda u halmivnomu rezhymi [On the issue of stability of a semi-trailer road train in braking mode]. *Naukovi Notatky*, 32, 197–199.
24. Kravchuk, P. M., Hryshchuk, O. K., & Babin, Yu. V. (2008). Stiikist rukhu avtopoizda v rezhymi halmuvannia [Stability of road train motion in braking mode]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, 10–11.
25. Podryhalo, M. A., Polianskyi, O. S., Abramov, D. V., et al. (2023). Dynamika halmuvannia ta teoriia robochykh protsesiv halmivnykh system kolisnykh traktoriv ta traktornykh poizdiv [Dynamics of braking and theory of working processes of braking systems of wheeled tractors and tractor trains] (Vol. 3). Kharkiv: Estet Print.
26. Sakhno, V., Onyshchuk, V., Bosenko, V., & Stelmashchuk, S. (n.d.). Do analizu protsesu halmuvannia avtomobilia z prychemom katehorii O2 [On the analysis of the braking process of a vehicle with a category O2 trailer]. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni ta Transporti*, 2(25), 254–265.
27. Sakhno, V., Murovanyi, I., Onyshchuk, V., Stelmashchuk, S., & Vintsiuk, M. (2024). Do vyznachennia stiikosti rukhu avtomobilia z prychemom katehorii O2 u halmivnomu rezhymi [On determining the stability of motion of a vehicle with a category O2 trailer in braking mode]. *Suchasni Problemy v Mashynobuduvanni i na Transporti*, 1(22), 96–306.
28. Sakhno, V. P., et al. (2021). Sharnirno-zchlenovani avtobusy. Manevrenist ta stiikist [Articulated buses. Maneuverability and stability]: Monograph. Lutsk: IVV Lutskoho NTU.

V. Stelmashchuk, S. Stelmashchuk Influence of effort in the traction and coupling on the stability of a light-tongue road train in the braking mode

The braking of a light-duty road train is often complicated by additional forces transmitted through the traction-coupling device, which can trigger jackknifing and loss of lateral stability. Earlier studies have shown that, under nominal loading and when braking forces on all wheels equal the coupling forces, the road train remains stable across the full range of trailer masses at 25 m/s; at 30 m/s the critical trailer mass drops to about 2500 kg. Those models, however, did not account for two factors: timing asynchrony between the car's and trailer's braking systems, and the compression force in the traction-coupling device.

This work refines the planar braking model of a light-duty road train to include both effects and analyses the transient response to step braking at initial speeds of 15 m/s and 25 m/s.

The results show that during the first 0.3 s after braking begins, the normal road reactions on the car and trailer axles remain almost unchanged, because the compression force in the coupling absorbs part of the longitudinal load transfer. Over this interval the articulation angle stays below 0.015 rad and the trailer's lateral deviation does not cross the lane boundary ($S_b = L_n \cdot \tan(0.015) = 0.029$ m). With time, however, the articulation angle grows and the trailer drifts beyond the lane: $S_b = 0.186$ m at $V = 15$ m/s and $S_b = 0.375$ m at $V = 25$ m/s. The trailer's lateral oscillations are damped and its lateral velocity stabilises over time, so the road train eventually recovers stability.

The compression force in the traction-coupling device therefore proves a non-negligible factor within the first 0.3 s of braking and should be included in stability assessments of light-duty road trains.

Key words: light-duty road train; braking; traction-coupling device; jackknifing; articulation angle; lateral stability; longitudinal load transfer; brake timing asynchrony.

СТЕЛЬМАЩУК Валерій Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: Val.stelmashchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3813-3143>

СТЕЛЬМАЩУК Станіслав Валерійович, аспірант четвертого року навчання кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, stanislav0077@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

Valery STELMASHCHUK, Ph.D in Engineering, associate professor of automobiles and transport technologies department, Lutsk National Technical University, e-mail: Val.stelmashchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3813-3143>.

Stanislav STELMASHCHUK, fourth-year postgraduate student at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University. stanislav0077@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

Дата надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

<https://doi.org/10.36910/wvqsev09>

Волков В.П.¹, Онищук В.П.², Волкова Т.В.¹, Павлюк В.І.², Левчук М.А.¹¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Транспортно-дорожній комплекс України живе у нових реаліях: за даними нормативної статистики, близько 83 % перевізників мають парк до трьох автомобілів, а 61 % — лише один. Утримувати власну виробничу базу з ділянками ТО, ремонту та діагностики для такого парку економічно невиправдано — але вимоги до технічного стану рухомого складу для усіх однакові.

У роботі запропоновано модель віртуального підприємства автомобільного транспорту «ХНАДУ – ТЕСА» — інформаційну надбудову, яка перебирає на себе функції технічного відділу, не вимагаючи власних виробничих площ. В основі — система супутникового моніторингу зі спеціалізованими інформаційно-програмними комплексами «Virtual mechanic «HADI-12»», «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»», «MonDiaFor «HADI-15»», «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»».

Описано тривірневу архітектуру системи: бортовий рівень (рухомий склад зі сканерами-комунікаторами і навігаційно-зв'язними приймачами), мережевий (GSM/GPRS, Internet) та серверно-аналітичний рівень (телематичний сервер з базою даних, обробка інформації, ГІС, web-доступ для клієнтів). Функції системи поділено на три групи: моніторинг — понад десяток контрольованих параметрів стану рухомого складу; управління — керування виконавчими пристроями, голосовий зв'язок з водіями, аналіз пробігу; зберігання і інтеграція — обмін даними із зовнішніми інформаційними системами.

Такий підхід дозволяє отримувати в середовищі ITS оперативну інформацію про умови експлуатації — дорожні, транспортні, атмосферно-кліматичні — та їхній вплив на технічний стан автомобіля, а тому формує основу управління життєвим циклом рухомого складу для дрібних перевізників.

Ключові слова: віртуальне підприємство автомобільного транспорту, технічна експлуатація, моніторинг рухомого складу, інформаційно-програмний комплекс, GPS/GSM, інтелектуальні транспортні системи, життєвий цикл.

ВСТУП

Транспортно-дорожній комплекс — одна з основних ланок економіки України, від ритму якої залежить і виробництво, і повсякденне життя громадян. Особливість сучасного ринку перевезень — велика частка дрібних перевізників: близько 61 % експлуатують лише один автомобіль, ще 22 % — до трьох [1]. Тобто переважна більшість парку зосереджена у невеликих підприємств автомобільного транспорту (далі — НПАТ), які за визначенням не мають ресурсів для утримання повноцінної виробничої бази з ділянками ТО, ремонту і діагностики.

При цьому вимоги до технічного стану рухомого складу — для усіх однакові. Чинні нормативи [3] не диференціюють перевізників за розміром парку. На практиці це означає, що НПАТ або порушують вимоги, або делегують ТО і ремонт на сторонні СТО — без зворотного зв'язку з виробником, без єдиного журналу обслуговування, без накопиченої статистики стану рухомого складу.

Виходом може стати віртуальне підприємство автомобільного транспорту (ПАТ) — інформаційна надбудова, яка приймає на себе функції технічного відділу для дрібних перевізників. У середовищі інтелектуальних транспортних систем (ITS) така надбудова дозволяє в реальному часі контролювати параметри рухомого складу, накопичувати статистику, формувати графіки ТО, оцінювати залишковий ресурс [4, 5]. Подібні системи активно впроваджуються — у [6] показано їх ефективність для управління технічним станом, у [7] описано окремі складові програмного забезпечення.

Проте сама концепція віртуального ПАТ як єдиної організаційної моделі, що замінює класичну структуру з виробничими підрозділами, потребує детального опрацювання — архітектури, функцій, вимог до обладнання. Саме це є предметом цієї роботи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питання технічної експлуатації автомобілів у дрібних перевізників розглядалися в багатьох роботах. У монографії [1] подано загальну характеристику стану галузі автомобільного транспорту України з докладною статистикою за структурою перевізників, на яку спирається ця робота. У

навчальному посібнику [2] викладено базові принципи технічної експлуатації, проте без урахування специфіки дрібних перевізників — фокус на класичному ПАТ. Нормативно-правова база [3] регламентує вимоги до ТО і ремонту, але теж розрахована на класичну структуру з власною виробничою базою.

Концепцію CALS-технологій у транспорті розкрито в монографії [4], де показано переваги управління життєвим циклом рухомого складу через інтегровані інформаційні системи. У роботі [5] детально розглянуто інформаційні системи моніторингу технічного стану транспортних засобів — описано архітектуру збору і обробки даних, особливості каналів зв'язку, типи бортових сенсорів.

Системи моніторингу безпосередньо для експлуатації автомобілів описані у [6] — з акцентом на польові методи спостереження за станом рухомого складу. Програмно-апаратний комплекс «Віртуальний механік» зі складом окремих ППК зареєстрований авторським свідоцтвом [7]. Зарубіжні дослідження [8] показують, що інтеграція моніторингу з ERP-системами перевізника дає до 20 % зниження витрат на обслуговування.

Незважаючи на наявні розробки, у літературі недостатньо опрацьовано модель єдиного віртуального підприємства, яке об'єднувало б функції моніторингу, управління і інтеграції зі сторонніми ІС в одну організаційну одиницю — саме як заміну класичній структурі ПАТ для дрібних перевізників. Розробка такої моделі — невирішена задача, на яку зорієнтована ця стаття.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка моделі віртуального підприємства автомобільного транспорту, яке виконує функції технічної служби для дрібних перевізників без потреби у власній виробничій базі.

Для досягнення мети сформульовано задачі:

- обґрунтувати потребу у віртуальній моделі ПАТ як альтернативи класичній структурі з виробничими підрозділами;
- розробити тривірневу архітектуру системи «ХНАДУ – ТЕСА» — бортовий, мережевий, серверний рівні;
- описати функціональні групи системи: моніторинг, управління, зберігання та інтеграція зі сторонніми ІС;
- визначити вимоги до бортового і серверного обладнання та програмного забезпечення.

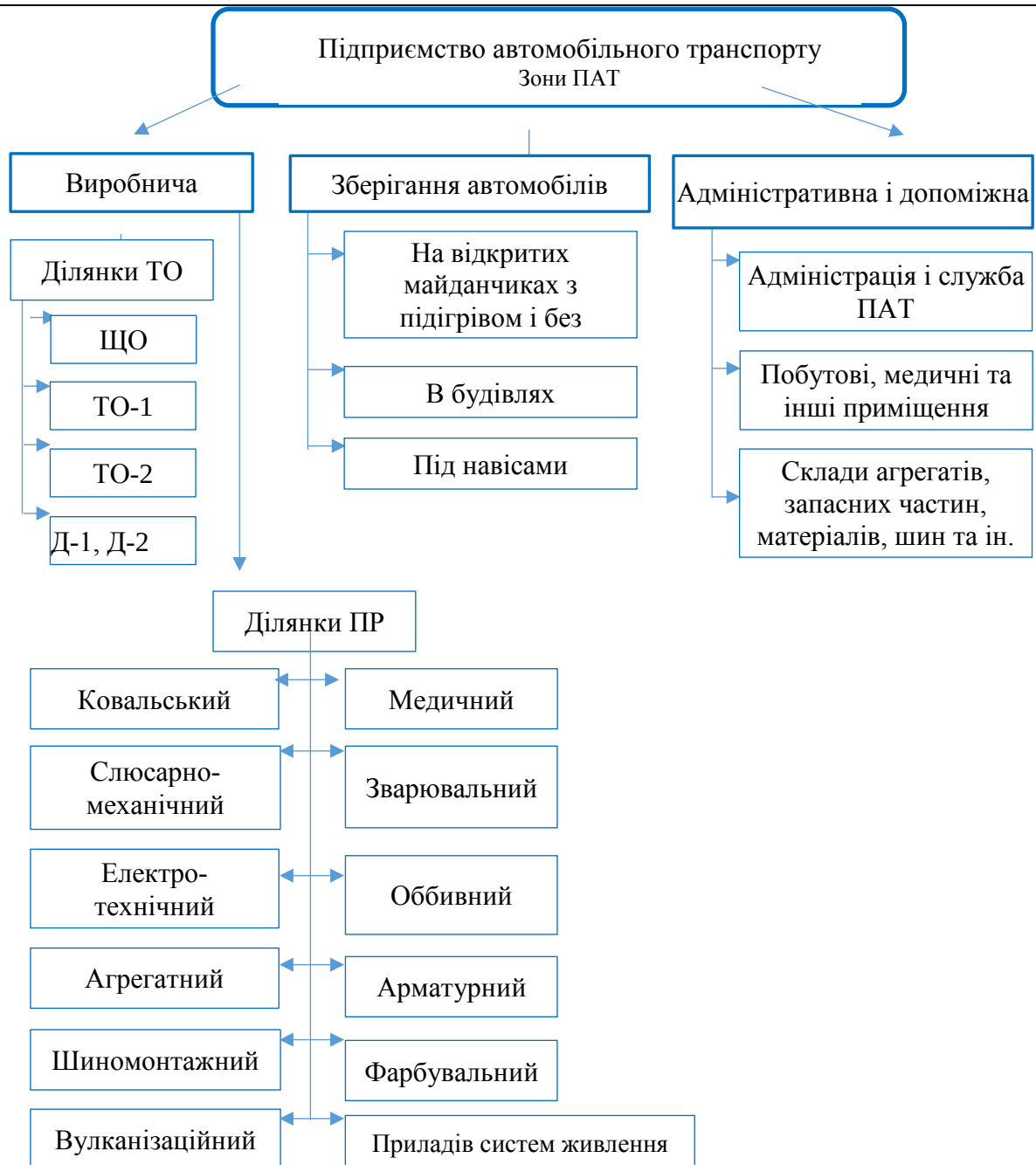


Рисунок 1 – Організаційна структура типового ПАТ

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Віртуальне ПАТ повинно мати майже усі підрозділи що і типове ПАТ і може забезпечувати безперервний моніторинг параметрів РС при невеликих експлуатаційних витратах за рахунок використання сучасних технологій мобільного бездротового зв'язку і професійного навігаційно-зв'язного обладнання [5]. Впровадження такої системи, це якісно новий рівень управління парком автомобільного транспорту загального користування (АТЗК) і невеликих підприємств автомобільного транспорту (НПАТ). Віртуальне ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» - має систему супутникового моніторингу РС, яка є спеціалізованим інформаційним програмним комплексом (ІПК) для контролю і управління технічною експлуатацією автомобілів (ТЕА) та комерційною експлуатацією (КЕ) в НПАТ [5]. Пропоноване віртуальне ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» призначене для вирішення виробничих завдань АТЗК і НПАТ по оптимізації роботи парку РС і є комплексним рішенням по моніторингу і управлінню ЖЦ етапу експлуатації РС (рис. 2).

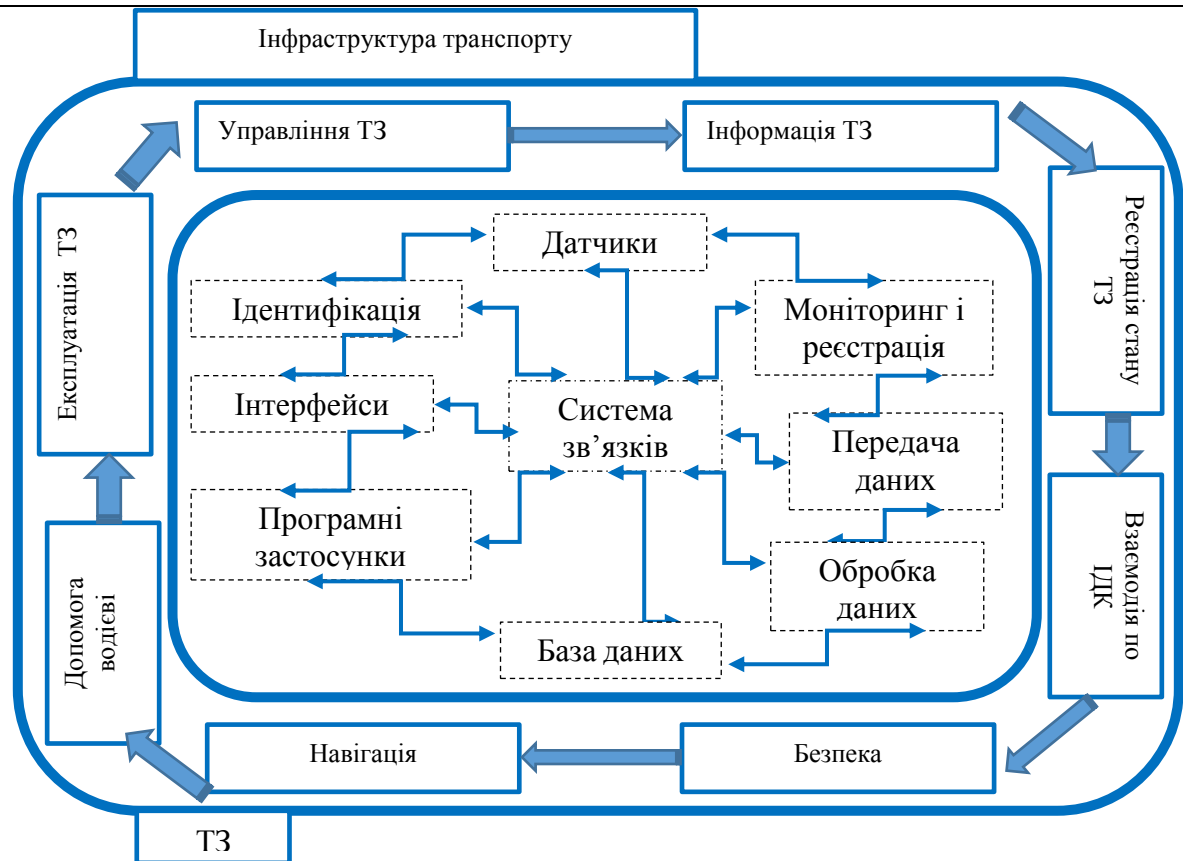


Рисунок 2 – Структурна схема транспортно-інформаційної системи моніторингу віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА»

РС підприємств, що користуються послугами «ХНАДУ - ТЕСА», оснащується навігаційно-зв'язними і телематичними навігаторами-приймачами, які дозволяють цілодобово контролювати навігаційні і технічні параметри РС різних категорій. Весь об'єм навігаційної і технічної інформації, що отримується від спостережуваного РС, надходить на телематичний сервер, зберігається в базі даних (*MS SQL* або *Interbase*) і стає доступною в науково-диспетчерському пункті ХНАДУ, де проходить подальшу обробку за допомогою спеціально розроблених ІПК «*Virtual mechanic «HADI - 12»»*», «*Service Fuel Eco «NTU-HADI - 12»»*», «*MonDiaFor «HADI - 15»»*», «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»»*» і ін. [4]. Далі інформація в «режимі блогу» сайту *khnadu.com*, стає доступна клієнтам - власникам як окремих одиниць, так і парку РС, тобто будь-якій людині, що безпосередньо координує роботу свого НПАТ, а також фахівцям-дослідникам.

Відмінною особливістю системи віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» є відсутність необхідності установки кожним клієнтом спеціального ПЗ, складного для звичайного сприйняття, в якому рядові системи можуть використовувати електронні векторні багатопланові карти місцевості і об'ємні масиви необхідних для прорахунків даних (від *Vin* номера автомобіля, до параметра тиску повітря у впускному колекторі двигуна). Вся інформація, піддана кваліфікованій обробці фахівцями ХНАДУ, доступна клієнтам через браузер в блозі - *khnadu.com*. У кожного клієнта є можливість побачити місцезнаходження і поточні характеристики, зокрема характеристики надійності, його РС через ПЗ серверної частини за адресою – *server.khnadu.com*.

В даному ІПК застосовуються гнучкі налаштування і прості у використанні інтерфейси, що максимально спрощує обробку інформації і оперативне управління, дозволяє у будь-який момент сформувати необхідні графіки і звіти (у форматах *MS Office*), а також відправити інформацію до інших ІС клієнта.

При впровадженні системи в НПАТ, деякі складові можуть мінятися залежно від вимог конкретного клієнта, проте загальний принцип побудови завжди залишається незмінним.

Основні функції системи віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» можна умовно розділити на три групи: функції контролю (моніторингу), функції управління і функції зберігання інформації і сполучення із зовнішніми ІС.

Функції моніторингу системи віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» [6]:

- автоматичне визначення параметрів стану агрегатів, систем і механізмів РС, які є у вільному доступі в бортовій системі діагностування (OBD);
- автоматичне визначення навігаційних параметрів РС (географічні координати, швидкість руху, азимут, висота над рівнем моря);
- автоматичне визначення параметрів стану РС за показниками контрольних пристроїв телематичних навігаторів-приймачів (наявність і «якість» електроживлення в системі управління робочими процесами двигуна і ін.; стан замків (відкрит/закрит) дверей пасажирського салону (кабіни); включення систем звукової, світлової сигналізації; положення кузова самоскида; робота навісного і додаткового устаткування, температурний режим, перевищення допустимої швидкості руху; рівень рідин в ємкостях (бак, цистерна) і ін.);
- автоматична передача в НПАТ навігаційної і іншої інформації про РС через заданий інтервал часу (періодичність від 20 секунд);
- автоматична передача в НПАТ позачергових повідомлень про зміну параметрів стану РС при спрацьовуванні контрольних пристроїв або датчиків (натиснення водієм тривожної кнопки, зміна режиму роботи додаткового устаткування, тривалий простій об'єкту, вхід об'єкту в певну зону або вихід з неї);
- автоматичне занесення навігаційної інформації і інформації про стан РС в незалежну пам'ять при втраті каналів зовнішнього зв'язку, з подальшою автоматичною або за запитом відправкою записаних даних в НПАТ;
- автоматичне стеження за виконанням РС маршруту або графіка руху з подачею тривожного повідомлення при відхиленнях;
- можливість вибору окремих одиниць РС для стеження за їх переміщенням і станом в режимі реального часу;
- відображення в графічній формі місцеположення і параметрів РС на векторних електронних картах місцевості;
- відображення даних про місцеположення і стан об'єктів в текстовій формі у вигляді таблиць;
- відображення в НПАТ позачергових повідомлень про зміну стану РС у вигляді тривожних вікон з подачею відповідного сигналу.

Функції управління системи віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» [7]:

- формування на електронних картах місцевості контрольних зон для відстежування переміщення РС;
- контроль і аналіз фактичного пробігу РС за певні проміжки часу;
- передача команд диспетчера на виконавчі пристрої РС (блокування системи пуску, виключення двигуна, включення системи аварійних сигналів, виклик водія, управління додатковим обладнанням);
- голосовий зв'язок диспетчера НПАТ з водіями РС;
- автоматичний запис в журнал подій всіх дій, проведених диспетчером НПАТ.

Функції системи «ХНАДУ - ТЕСА» по зберіганню інформації і інтеграції із зовнішніми ІС [7]:

- зберігання інформації в єдиній БД (*MS SQL* або *Interbase*);
- перетворення інформації у формат, сумісний з призначеними для користувача ІС;
- обмін даними з призначеними для користувача ІС;
- створення БД у форматі призначених для користувача архівів.

За принципом побудови система віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» містить три основні частини:

- «РС» - об'єкти моніторингу (контролю);
- «мережі передачі інформації» - *GSM/GPRS, Internet* ;
- «Система обробки і зберігання інформації» - телематичний сервер.

РС - об'єкт контролю (моніторингу) в системі віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА», оснащений навігаційно-зв'язними і прийомо-передаючими пристроями, виконаними у вигляді компактного модуля - телематичного приймача-навігатора (далі контролер сканер-комунікатор) з контрольними пристроями, а також засобами текстовою, голосовою і відео зв'язку.

Контролер сканера-комунікатора - це абонентський термінал, який служить для прийому і обробки сигналів навігаційних супутників. Він отримує дані з пристроїв контролю параметрів стану автомобіля і його елементів, забезпечує зв'язок з телематичним сервером, передає управляючі сигнали на бортові виконавчі пристрої.

В системі ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» використовуються сучасні серійно-вироблювані сканери-комунікатори від ведучих світових постачальників обладнання зв'язку (*Globalsat, Hexun, GALILEO, Teltonika* і ін.), які проходять тестування і доопрацювання (по корпусу, обв'язуванню, внутрішній логіці) фахівцями компанії «М2М телематика» [4]. Прийомо-передаючі вузли сканерів-комунікаторів використовують мережі зв'язку стандарту *GSM*. Для функціонування системи неважливо, який виробник сканер-комунікатора, важлива наявність в пристрої саме *GSM* модуля зв'язку, оскільки система віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» підтримує будь-які протоколи обміну даними з використанням мережі *GSM* між РС і телематичним сервером.

Як навігаційне обладнання в сканерах-комунікаторах використовуються приймачі глобальних систем навігації *GPS*, що дозволяє з високою точністю визначати місцезнаходження і навігаційні параметри (швидкість, напрям руху, висоту над рівнем моря) РС, використовуючи сигнали навігаційних супутників.

Зараз як абонентські термінали в системі віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» використовуються серійно вироблювані *GPS/GSM/GPRS* термінали *BN-City GX*.

Пристроями контролю параметрів стану автомобіля і його елементів, що підключаються до контролера сканера-комунікатора на борту РС, служать датчики і вимірювальні пристрої різних типів [4]:

- логічні, які здійснюють контроль числа і місць зупинок, моменту часу входу/виходу в певні зони, моменту досягнення допустимої швидкості руху, підрахунок пробіг і ін.;
- цифрові, які визначають момент відкриття дверей кузова (кабіни), момент пуску мотора, положення самоскидного кузова, стріли автокрана і ін.;
- аналогові, які визначають температуру, вагові навантаження, напругу в системі електрообладнання, рівень рідини в різних ємностях (бак, цистерна), число обертів колінчатого валу двигуна і ін.

Виконавчі пристрої підключаються до контролера сканера-комунікатора і служать для виконання автоматичних команд або команд, що подаються оператором з диспетчерського пункту віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА». Такими пристроями можуть бути реле блокування пуску двигуна, включення систем звукової або світлової сигналізації, управління температурними режимами і ін.

Дисплей, що підключається до контролера сканера-комунікатора забезпечує можливість отримання водієм інформації в текстовій формі, а підключаювана аудіо- відеогарнітура — голосовий і відеозв'язок з диспетчерськими пунктами.

Застосування технологій передачі інформації по стільникових мережах зв'язку істотно підвищує ефективність системи в цілому. При використанні абонентських терміналів з передачею зв'язку по каналах *GSM/GPRS, GSM/SMS* і *GSM* система віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» забезпечує доступ до всіх видів інформації, включаючи голосову, фото і відеозв'язок. Вибір оператора мережі передачі обумовлений специфікою умов використання системи і вартістю послуг, що надаються оператором. Як оператори мереж передачі інформації на території України можуть використовуватися: *МТС, КиївСтар, Life, Beeline, Utel* і ін.

Телематичним сервером є апаратний серверний блок зі встановленим на нім комплексом серверного ПЗ, підключений до мережі *Internet* з привласненим статичним *IP*-адресом. Універсальна архітектура у поєднанні з простими алгоритмами роботи і висока пропускна спроможність телематичного сервера дозволяє підключати до системи до декількох тисяч абонентських терміналів без помітного зниження швидкодії системи в цілому.

Основні функції телематичного сервера віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» [7]:

- встановлення з'єднань зі сканерами-комунікаторами РС і диспетчерськими пунктами;
- прийом і обробка текстових повідомлень, що надходять від користувачів системи і команд оперативного управління;
- прийом і обробка навігаційних і телематичних параметрів, що надходять від сканерів-комунікаторів і автоматичних підтверджень виконання команд оперативного управління;
- передача на диспетчерські пункти поточних і архівних навігаційних і телематичних параметрів РС;
- зберігання інформації в єдиній БД (*MS SQL* або *Interbase*);
- формування звітів за запитом з диспетчерських пунктів;
- перетворення інформації у формат, сумісний з призначеними для користувача ІС;
- обмін даними з призначеними для користувача ІС;

- створення БД у форматі призначених для користувача архівів;
- зберігання і розподіл інформації з БД електронних карт місцевості (ГІС);
- ретрансляція даних на інші сервери.

Диспетчерський пункт віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» представляє собою робоче місце диспетчера - механіка: робоча станція (комп'ютер) зі встановленим на ньому спеціалізованим ПЗ [4].

Робочі клієнтські персональні комп'ютери (ПК) можуть знаходитися як всередині локальної мережі підприємства, так і поза такою з підключенням через мережу *Internet*. Для тих випадків, коли потрібне тільки періодичне спостереження за роботою РС, можливе підключення до телематичного сервера спрощених версій диспетчерських пунктів з використанням *Web*-технологій. ПЗ сервера - це розробка компанії *BN™*, яке призначене для автоматизації робочого місця «наукових» диспетчерів і клієнтів віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА». ПЗ, використовуване в побудові системи, є розробкою компанії «M2M телематика». Воно формує на екрані монітора (рис. 3) [4]:

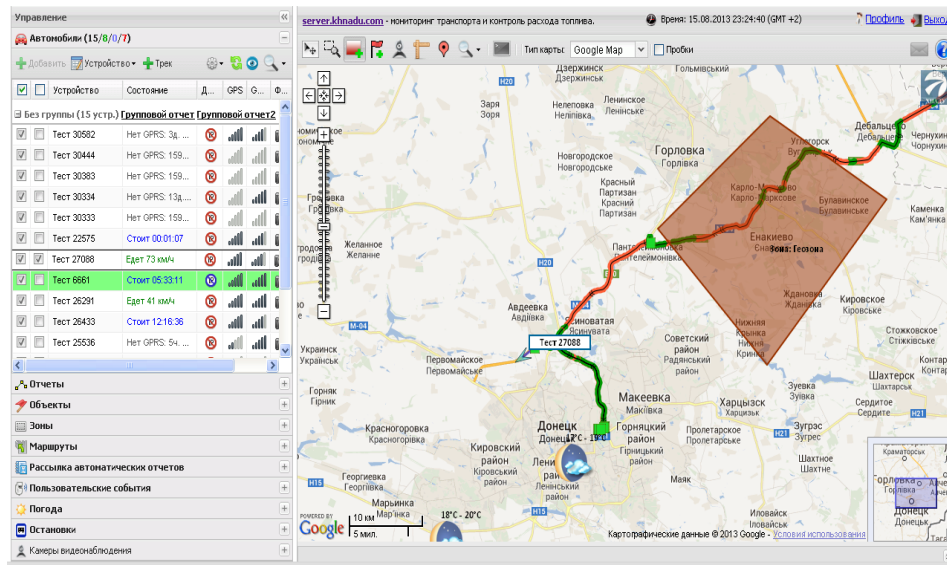


Рисунок 3 - Вид інформації монітора, що забезпечується ПЗ серверної системи віртуального ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА»

- головне табличне вікно з картою місцевості і маршрутом в режимі стеження за об'єктом.
- верхню панель роботи з контрольними зонами (геозони).
- бічну панель управління РС.

Основні функції ПЗ *BN™*:

- контроль технічного стану РС на основі інформації, що надходить;
- відображення місцеположення РС на електронних картах місцевості;
- реєстрація планових і позапланових подій, що відбуваються;
- можливість формування маршрутних листів;
- внесення позапланових змін до маршрутів і графіків руху;
- автоматичний і візуальний контроль відповідності маршрутам і графікам руху РС;
- формування планових маршрутів, розкладів і графіків РС;
- занесення інформації про РС і персонал в БД системи;
- видача узагальненої інформації про поточний і загальний стан автопарку у вигляді звітів в стандартних форматах;

- інформування диспетчерів про зміни в маршрутах і графіках руху;
- робота з електронними картами місцевості.

Інформація про обладнання (пристрої інформаційні, гаджети, контролери, сканери-комунікатори (трекери), адаптери, систему зв'язку), а також особливості роботи алгоритмів ПЗ, що використовується для оцінки процесів експлуатації РС приведено в монографіях і статтях, які є в переліку посилань.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропонована модель віртуального ПАТ принципово відрізняється від класичної структури (рис. 1) насамперед тим, що не потребує власних виробничих площ — функції технічного відділу делегуються інформаційній системі, а фактичні ТО і ремонт виконуються сторонніми СТО за рекомендаціями системи. Це дає економічну перевагу для дрібних перевізників, які складають близько 83 % ринку [1].

Порівняно з традиційними системами супутникового моніторингу [6], віртуальне ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА» вирізняється модульною архітектурою — клієнт не встановлює спеціалізоване ПЗ, доступ до системи здійснюється через звичайний браузер (server.khnadu.com). Це зменшує поріг входу для невеликих перевізників, які зазвичай не мають у штаті ІТ-спеціалістів.

Слабке місце моделі — залежність від стабільного GSM-покриття. У сільській місцевості Західної України, де часто рухається дрібний транспорт, перерви зв'язку трапляються регулярно. Часткове рішення — автономне накопичення даних з подальшою відкладеною передачею (передбачено в архітектурі), але це не вирішує проблему оперативного контролю в реальному часі.

Друга суттєва обмеженість — необхідність уніфікованого підходу до автомобілів різних виробників і поколінь. У парку дрібного перевізника часто перебувають автомобілі віком 10+ років, для яких OBD-діагностика недоступна або працює неповноцінно. Розширення на старий парк потребує додаткових сенсорів, що збільшує вартість бортового обладнання.

Перспектива — інтеграція з державними реєстрами (Сервісний центр МВС, дані технічного огляду) для автоматичного формування графіка обов'язкових процедур, а також розширення системи на причепа й напівпричепа — для повноцінного управління автопоїздами, а не тільки одиничними автомобілями.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано необхідність віртуальної моделі ПАТ як альтернативи класичній структурі для дрібних перевізників, які складають близько 83 % ринку автомобільних перевезень України і для яких утримання власної виробничої бази економічно недоцільне.

2. Розроблено трирівневу архітектуру системи «ХНАДУ – ТЕСА»: бортовий рівень (рухомий склад зі сканерами-комунікаторами і навігаційно-зв'язними приймачами), мережевий (GSM/GPRS, Internet) і серверно-аналітичний рівень (телематичний сервер з базою даних, обробка інформації, ГІС, web-доступ для клієнтів).

3. Функції системи поділено на три групи — моніторинг, управління, зберігання та інтеграція. Розроблено перелік контрольованих параметрів стану рухомого складу та командних інтерфейсів управління.

4. Визначено вимоги до бортового обладнання (підтримка стандартів GSM, GPS, OBD), серверної частини (статична IP-адреса, MS SQL / Interbase, ГІС) і програмного забезпечення (модульність, browser-based доступ для клієнтів).

5. Запропонована модель дозволяє отримувати в середовищі ITS оперативну інформацію про умови експлуатації — дорожні, транспортні, атмосферно-кліматичні — та їхній вплив на технічний стан автомобіля, що формує основу управління життєвим циклом рухомого складу для дрібних перевізників.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку : монографія / Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут ; за заг. ред. А. М. Редзюка. Київ : ДержавтотрансНДІпроект, 2005. 400 с.

2. Дембіцький В. М., Павлюк В. І., Придюк В. М. Технічна експлуатація автомобілів : навч. посібник. Луцьк : ЛНТУ, 2018. 473 с.

3. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту : Наказ Міністерства транспорту України від 30.03.1998 № 102, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 28.04.1998 за № 268/2708.

4. Інжиніринг систем контролю і управління технічним станом автомобілів : монографія / В. П. Волков, І. А. Мармут, Т. В. Волкова, В. В. Верхломчук. Харків : ХНАДУ, 2025. 326 с.

5. Volkov V., Gritsuk I., Taran I. Information Systems for Vehicle Technical Condition Monitoring. Modern Trends in Financial and Innovation Data Processes 2023 (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 1). Springer, 2024. P. 61–96.

6. Мигаль В. Д., Шевченко І. О., Шуляк М. Л. Системи моніторингу ефективної експлуатації автомобілів : навч. посібник. Харків : ДБТУ ; Майдан, 2023. 288 с.

7. Технічний регламент програмного продукту «Віртуальний механік «HADI-12»» при звичайній роботі : твір наукового характеру / В. П. Волков, П. Б. Комов, О. Б. Комов та ін. Свідectvo про реєстрацію авторського права на твір № 47230 від 15.01.2013.

8. Vlachos I., Pascuzzi R. M., Zolas G., Repoussis P., Giannakis M. Lean manufacturing systems in the area of Industry 4.0: A lean automation plan of AGVs/IoT integration. *Production Planning & Control*. 2023. Vol. 34, No. 4. P. 345–358. DOI: 10.1080/09537287.2021.1917720.

REFERENCES

1. Redziuk, A. M. (Ed.). (2005). *Avtomobilnyi transport Ukrainy: stan, problemy, perspektyvy rozvytku* [Motor transport of Ukraine: state, problems, prospects of development]: Monograph. Kyiv: DerzhavtotransNDIproekt.

2. Dembitskyi, V. M., Pavliuk, V. I., & Prydiuk, V. M. (2018). *Tekhnichna ekspluatatsiia avtomobiliv* [Technical operation of automobiles]: Textbook. Lutsk: LNTU.

3. Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnikh transportnykh zasobiv avtomobilnoho transportu [Regulations on technical maintenance and repair of road transport vehicles] (Order of the Ministry of Transport of Ukraine No. 102 of 30.03.1998, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 28.04.1998 under No. 268/2708).

4. Volkov, V. P., Marmut, I. A., Volkova, T. V., & Verkhloenchuk, V. V. (2025). *Inzhynirynh system kontroliu i upravlinnia tekhnichnym stanom avtomobiliv* [Engineering of automobile technical condition control and management systems]: Monograph. Kharkiv: KhNAHU.

5. Volkov, V., Gritsuk, I., & Taran, I. (2024). Information Systems for Vehicle Technical Condition Monitoring. In *Modern Trends in Financial and Innovation Data Processes 2023* (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Vol. 1, pp. 61–96). Cham: Springer.

6. Myhal, V. D., Shevchenko, I. O., & Shuliak, M. L. (2023). *Systemy monitorynhu efektyvnoi ekspluatatsii avtomobiliv* [Systems for monitoring efficient operation of automobiles]: Textbook. Kharkiv: DBTU; Maidan.

7. Volkov, V. P., Komov, P. B., Komov, O. B., et al. (2013). *Tekhnichni rehlement prohramnoho produktu "Virtualnyi mekhanik «HADI-12»" pry zvychainii roboti* [Technical regulations of the software product "Virtual Mechanic «HADI-12»" in regular operation] (Certificate of copyright registration No. 47230, dated 15.01.2013).

8. Vlachos, I., Pascuzzi, R. M., Zolas, G., Repoussis, P., & Giannakis, M. (2023). Lean manufacturing systems in the area of Industry 4.0: A lean automation plan of AGVs/IoT integration. *Production Planning & Control*, 34(4), 345–358. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1917720>

V. P. Volkov, V. P. Onyshchuk, T. V. Volkova, M. A. Levchuk, V. I. Pavliuk. Aspects of designing a virtual motor transport enterprise

The transport sector of Ukraine is dominated by small operators: about 83 % of carriers have fleets of one to three vehicles, and 61 % own a single vehicle. Maintaining a full-scale operating base — service bays, repair workshops, diagnostics — is not economically feasible for such operators, yet the technical standards for vehicle condition apply to them equally.

This paper proposes a model of a virtual motor transport enterprise — an information layer that performs the technical-service functions traditionally carried out by an in-house department, without requiring physical production facilities. The model is implemented as the KhNAHU–TESA system, built around satellite monitoring of rolling stock and integrated with specialised software complexes (Virtual mechanic «HADI-12», Service Fuel Eco «NTU-HADI-12», MonDiaFor «HADI-15», IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»).

The system has a three-tier architecture: an onboard layer (vehicles fitted with scanner-communicators and GPS/GSM receivers), a network layer (GSM/GPRS, Internet) and an analytical server layer (telematics server, MS SQL/Interbase database, GIS, browser-based access for clients). System functions fall into three groups: monitoring (real-time tracking of vehicle status, navigation parameters, fuel consumption, alarms), control (dispatcher commands, voice communication, route compliance) and information storage with integration into third-party systems.

The approach lets small carriers access ITS-grade fleet management while avoiding capital investment in physical infrastructure, and supplies researchers with continuous operational data on the influence of road, traffic and climatic conditions on vehicle technical condition.

Key words: virtual motor transport enterprise; technical operation; vehicle monitoring; rolling stock; GPS/GSM; intelligent transport systems; fleet management; vehicle life cycle.

ВОЛКОВ Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, e-mail: volf-949@ukr.net.

ОНИЩУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>.

ВОЛКОВА Тетяна Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, e-mail: wolf949@ukr.net.

ПАВЛЮК Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>.

ЛЕВЧУК Максим Анатолійович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: Levchuk.max@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3736-7465>.

Volodymyr VOLKOV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Operation and Service of Automobiles, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, e-mail: volf-949@ukr.net.

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>.

Tetiana VOLKOVA, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, e-mail: wolf949@ukr.net.

Vasyl PAVLIUK, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>.

Maksym LEVCHUK, PhD student, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: Levchuk.max@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3736-7465>.

Дата надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.04.2026

<https://doi.org/10.36910/ke19t134>

ПЕРЕЛІК РЕЦЕНЗЕТІВ

Бартоломейчик Миколай, доктор інженерії, Політехніка Гданська (Польща).

Грабовець Віталій Валерійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Дембіцький Валерій Миколайович, к.т.н., доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Дударєв Ігор Миколайович, д.т.н., професор, професор кафедри технологій і обладнання переробних виробництв ЛНТУ.

Захарчук Віктор Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Кравченко Олександр Петрович, доктор технічних наук, професор, Університе Жиліни, Словаччина

Матейчик Василь Петрович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет

Мурований Ігор Сергійович, к.т.н., доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії ЛНТУ.

Налобіна Олена Олександрівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських робіт і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування.

Пустюльга Сергій Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри архітектури та дизайну ЛНТУ.

Самостян Віктор Русланович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Самчук Володимир Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії ЛНТУ.

Сахно Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Сітовський Олег Пилипович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Стельмашук Валерій Віталійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ

Таран Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор, Ржешівська Політехніка, Польща

Толстушко Микола Миколайович, к.т.н., доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування ЛНТУ.

Цизь Ігор Євгенович, к.т.н., доцент, доцент кафедри аграрної інженерії ім. проф. Г.А. Хайліса ЛНТУ.

Шимчук Сергій Петрович, к.т.н., доцент, доцент

LIST REVIEWERS

Nikolai Bartolomeychyk, Doctor of Engineering, Gdansk Polytechnic (Poland).

Vitaliy Grabovets - Ph.D., Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Valery Dembitsky, Ph.D., Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Igor Dudarev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment for Manufacturing of LNTU.

Viktor Zakharchuk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of Automobile and Transport Technologies Department of LNTU.

Alexander Kravchenko, Dr. Sc. Tech., prof., professor Department of Transport and Handling Machines, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Vasyl Mateichyk, Doctor of Science (Engineering), professor, National Transport University

Igor Murovanyi, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering of Lutsk NTU.

Olena Nalobina, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Construction, Road, Reclamation, Agricultural Works and Equipment, National University of Water Management and Nature Management.

Sergiy Pustulga, Doctor of Science (Engineering), Professor of Architecture and Design department LNTU.

Victor Samostyan, Ph.D., Associate Professor Assoc., Professor of Automobile and Transport Technologies Department of LNTU

Volodymyr Samchuk, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Civil Engineering LNTU.

Volodymyr Sakhno, Doctor of Science in Engineering, Professor of Automobiles Department, National Transport University, Kiev, Ukraine.

Oleg Sitovsky, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Valery Stelmashchuk, Ph.D in Engeneering, Associate Professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University

Igor Taran, Doctor of Science in Engineering, Professor, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza, Poland.

Mykola Tolstushko, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industry Engineering of LNTU.

Igor Tsizh, Ph.D., Associate Professor, Assoc. Professor of the Department Agricultural Engineering of LNTU.

Sergiy Shymchuk, Ph.D, Associate Professor, Associate

кафедри галузевого машинобудування ЛНТУ.

Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор,
професор кафедри галузевого машинобудування
ЛНТУ.

Professor of the Department of Industry Engineering of
LNTU.

Mykola Yaroshevych, Doctor of Science in Engineering,
Professor, Department of Sector Engineering of LNTU.

Ціна договірна

Колектив авторів

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ

ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ SCIENTIFIC JOURNAL

Випуск 1 (26), 2026 Volume 1 (26), 2026

Видається двічі на рік Publication Frequency: 2 issues per year

Комп'ютерний набір та верстка: В. Самостян

Матеріали друкуються в авторській редакції. За стилістику і орфографію статей відповідальність несуть автори.

Адреса редакції:
вул. Львівська, 75, ауд. 148, Луцьк,
Волинська обл., Україна, 43018.
тел. (0332) 74-61-31.
e-mail: tehavtomash@gmail.com

Підписано до друку 23.05.2024 р.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 27,6. Обл. вид. арк. 19,71. Тираж 100 прим.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.