

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

№2 (25)

2025

ЛУЦЬК LUTSK

Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2025.– №2(25).– 314 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.

Заступник головного редактора: **Дударєв Ігор Миколайович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет;

Видавничий редактор: **Самостян Віктор Русланович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Відповідальний секретар: **Онищук Василь Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Члени редколегії: **Бартломейчик Миколай**, доктор інженерії, Гданський технологічний університет (Республіка Польща); **Заболотний Олег Васильович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Захарчук Віктор Іванович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет; **Кравченко Олександр Петрович**, д.т.н., професор, University of Žilina, Slovenská Republika; **Луїс Фролен Рібейро**, професор, Політехнічний Інститут Браганси (Португалія), **Мурований Ігор Сергійович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Налобіна Олена Олександрівна** д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, **Поляк Мілош**, PhD, професор, декан факультету управління транспортом та телекомунікацій University of Žilina, Slovenská Republika, **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), **Цизь Ігор Євгенович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Шимчук Сергій Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Друкується за рішенням вченої ради
Луцького національного технічного університету
(Протокол № 5 від 28.11.2025р.)

ЗМІСТ		CONTENT	
Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з трьома повільними автомобілями на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування.....	6	P. Horbachov, S. Svichynskyi the average vehicle speed in a dense traffic flow with three slow-moving vehicles on a road section with limited manoeuvring opportunities.....	6
Хаврук В. О. Оцінка ефективності експлуатації вантажних автомобілів.....	23	V.O. Khavruk Truck operation efficiency assessment.....	23
А. Кочина. Дослідження попиту на автомобільні перевезення громадським транспортом в приміському сполученні..	34	A. Kochina Research on the demand for road public transportation in suburban traffic.....	34
А. Коробко, І. Семенов, Функціональна адаптація зерновоза при нестабільній масі зерна, що перевозиться	41	A. I. Korobko, I. V. Semenov Functional adaptation in a grain carrier when the mass of transported grain is unstable	41
Кирилаха С.В. Математичне моделювання термонапруженого стану при адитивному виготовленні та зварюванні титанових сплавів для транспортного машинобудування.....	52	S.V. Kyrylakha Mathematical modelling of thermomechanical state in additive manufacturing and welding of titanium alloys for transport engineering.....	52
Павленко О.В., Єлістратов В.О., Черниш А.А., Харьков О.А. Удосконалення технології виготовлення корпусів тягових акумуляторних батарей електромобілів для захисту від ударних пошкоджень.....	61	O.V. Pavlenko, V.O. Yelistratov, A.A. Chernysh, O.A. Kharkov Improving the technology for manufacturing electric vehicle traction battery housings to protect against impact damage	61
Півторак Г.В., Прусський Є.В. Використання кластерного аналізу для вивчення характеристик мікровантажних потоків покупців....	68	H. Pivtorak, Ye. Pruskyi Using cluster analysis to study the characteristics of micro-freight flows of shoppers.....	68
Птиця Н.В. Моделювання додаткових витрат часу в системі автомобільних перевезень на етапі Last Mile.....	77	N. Ptytsia Modeling of additional time costs in the road transport system at the last mile stage	77
Птиця Н.В., Птиця Г.Г. Роль штучного інтелекту у формуванні адаптивних і сталих ланцюгів постачання.....	82	N.V. Ptytsia, H.Hr. Ptytsia The role of artificial intelligence in building adaptive and sustainable supply chains.....	82
Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Гринь А.П., Фролов М.О., Бернацький А.В. Вплив параметрів лазерного зварювання на геометрію зварних з'єднань тонколистової корозійностійкої сталі AISI 304.....	87	Yu.V. Yurchenko, O.V. Siora, M.V. Sokolovskiy, A.P. Hryn, M.O. Frolov, A.V. Bernatskiy Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304.....	87
Зибцев Ю.В., Ворошилов П.А., Шевердін І.М. Експериментальна оцінка методів розрахунку часу розгону транспортного засобу	97	Y.V. Zybtev, P.A. Voroshylov, I.M. Sheverdin Experimental evaluation of methods for calculating vehicle acceleration time	97
Баранов І.О. Баранський М.Б. Швець С.Е. Оптимізація оперативного планування вантажних автомобільних перевезень з урахуванням особливостей доставки малих партій вантажів.....	106	I. Baranov, M. Baranskiy, S. Shvets Optimization of Operational Planning for Freight Road Transport Taking into Account the Specifics of Small Batch Delivery.....	106
Бодак М.В., Бодак В.І. Види систем терморегуляції тягової батареї електромобіля та їх аналіз.....	114	M. Bodak, V. Bodak Types of thermal regulation systems of the traction battery of an electric vehicle and their analysis.....	114

Бугайова М.О., Холодова О.О., Бугайов І.С., Шевчук Є.В. Моделювання впливу параметрів дорожніх пагорбів на роботу нерегульованого перехрестя	121	M. Buhaiova, O. Kholodova, I. Bugayov, Y. Shevchuk Modeling the influence of road humps parameters on the operation of an uncontrolled intersection.....	121
Голотюк М.В., Налобіна О.О., Бундза О.З. Аналіз впливу елементів рушія важких тракторів на величину тиску на ґрунт.....	131	M. Holotiuk, O. Nalobina, O. Bundza Analysis of the influence of traction system elements of heavy tractors on soil pressure	131
Дитяцьєв О.В. Оцінка впливу нелінійних характеристик компонентів підвіски, амортизатора, на результати їх діагностування.....	140	O. Dityatyev Assessment of the influence of nonlinear characteristics of suspension components, shock absorber, on the results of their diagnostic.....	140
Захарчук О.В., Захарчук В.І., Хомич С.М., Приступа С.О. Використання машинобудівних технологій при ремонті та відновленні деталей.....	150	V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, S. Khomych, S. Prystupa The Use of Mechanical Engineering Technologies in the Repair and Restoration of Parts.....	150
Іванкова О. В., Федін В. О. Дослідження параметрів технології відновлення деталей пластичним деформуванням	155	O. Ivankova., V. Fedin. Research of parameters of the technology of restoration of parts by plastic deformation.....	155
Ковціур К.Г., Федоров В.Ю. Розробка плану експерименту процесу обслуговування вантажних автомобілів в пунктах переробки.....	165	K. Kovtsur, V. Fedorov Development of an experimental plan for the truck maintenance process at recycling points.....	165
Кондратюк М.А. Дослідження умов експлуатації вантажних гібридних автомобілів категорії N1.....	174	M. Kondratiuk Research of operation conditions for N1 category hybrid trucks.....	174
Куць Н.Г. Сучасні експлуатаційні вимоги до дорожніх транспортних засобів	183	N.G. Kuts Contemporary Operational Requirements for Road Vehicles	183
Любий Є.В., Горбачов П.Ф., Капінус С.В., Губарєв О.С. Експериментальна оцінка впливу часу випередження на ефективність плану координації.....	190	Ye. Liubiyi, P. Horbachov, S. Kapinus, O. Hubariiev Experimental estimation of the impact of advance time on the efficiency of a coordination plan.....	190
Максимова О.С., Максимов С.В., Потапенко В.В. Економічна ефективність галузевої централізації ремонтів і обслуговування технологічного автотранспорту на залізничних кар'єрах	198	O. Maksymova, S. Maksymov, V. Potapenko Economic Efficiency of Centralized Maintenance and Servicing of Technological Vehicles in Iron Ore Quarries	198
Мармут І.А., Безрідний В.В. Математичні моделі для розрахунку викидів токсичних речовин автобуса з дизельним двигуном..	210	I. Marmut, V. Bezridnyi Mathematical models for calculating toxic emissions of a bus with a diesel engine.....	210
Мельнікова Ю.І. Стратегії управління автомобільними перевезеннями в умовах глобальних ринкових змін: аналіз діяльності логістичних операторів	220	Yu. Melnikova Strategies for managing road transportation in the context of global market changes: analysis of the activities of logistics operators	220
Москалюк М. Л., Кашканов А. А. Управління запасами запасних частин у логістиці автомобільних перевезень в умовах багатофакторної невизначеності	230	M. Moskaliuk, A. Kashkanov Spare Parts Inventory Management in Freight Transport Logistics under Multifactor Uncertainty.....	230

Пузир Р.Г., Савелов Д.В., Качмар Р.Я., Дмитрів І.В., Козлов Р.Р., Єрух Є.І. Обґрунтування рекомендацій щодо проектування технологічного процесу виготовлення та ремонту з'єднувальних елементів вихлопної системи автомобілів.....	239	R. Puzyr, D. Savielov, Roman Kachmar, I. Dmytriv, R. Kozlov, Ye. Yeruh Justification of recommendations for the design of technological processes for manufacturing and repairing connecting elements in automotive exhaust systems.....	239
Самостян В.Р., Гандзюк М.О., Дембіцький В.М. Тенденції розвитку автомобільної галузі в умовах цифровізації	248	V. Samostian, M. Handziuk, V. Dembitskyi Tendencies in the development of the automotive industry under digitalization conditions	248
Сахно В.П., Онищук В.П., Босенко В.М., Стельмащук С.В. До аналізу процесу гальмування автомобіля з причепом категорії О2.....	254	V. P. Sakhno, V. P. Onyshchuk, V. M. Bosenko, S. V. Stelmashchuk Analysis of the Braking Process of a Vehicle with an O2-Category Trailer.....	254
Соколенко О.В. Можливість застосування телематичних систем для контролю за технічним станом транспортних засобів...	266	O. V. Sokolenko The possibility of using telematics for monitoring the technical condition of vehicles.....	266
Солтус А.П., Клімов Е.С., Тарандушка Л.А. Визначення коефіцієнта опору бічному відведенню..	273	A. P. Soltus, E. S. Klimov, L. A. Tarandushka Cornering stiffness determination	273
Сістук В.О. Моделювання генерації попиту для автомобільних вантажних перевезень у місті Кривий Ріг.....	284	V. Sistuk Modelling trip generation for road freight transportation in Kryvyi Rih.....	284
Шуба Є.В., Добровольський О.С., Маринич О.О. Вплив виду палива на паливну економічність та екологічні показники автомобільного двигуна.....	292	Y. Shuba, O. Dobrovolskyi, O. Marynych Influence of fuel type on the fuel economy and environmental performance of an automotive engine..	292
Полінкевич Р., Зубовецька Н., Редько Р., Четверзжук Т., Залета О., Валецький Б., Пилипець М. Дослідження температурних процесів при свердлінні отворів.....	305	R. Polinkevich, N. Zubovetska, R. Redko, T. Chetverzhuk, O. Zaleta, B. Valetskyi, M. Pylypets Research of temperature processes during drilling of holes.....	305
Перелік рецензентів	313	List reviewers	313

Horbachov P., Svichynskiy S.
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

THE AVERAGE VEHICLE SPEED IN A DENSE TRAFFIC FLOW WITH THREE SLOW-MOVING VEHICLES ON A ROAD SECTION WITH LIMITED MANOEUVRING OPPORTUNITIES

Forecasting the urban traffic flow parameters remains one of the most challenging tasks for scientists and practitioners around the globe. The fundamental diagram of a traffic flow, which is a statistically established relationship between flow parameters, helps to solve this task. This diagram shows a decrease in speed with an increase in flow density, and one of the explanations for this is that drivers are forced to adapt to the speed of slower vehicles in front. This affects the variation of speed and indicates that it is reasonable to consider it a random variable with the mean and distribution, which depend on traffic conditions. For free flow, the normal vehicle speed distribution is generally recognised, while the issue of what distribution to use to represent the speed in dense traffic remains open. The current research contributes to the clarification of this issue, and its core is an elaboration of the process of forming an average speed of similar vehicles in the densest traffic flow on a road section with no overtaking opportunities. The search for this average value was started by considering the simplest situations of a vehicle platoon, where all vehicles are expected to move at the same maximum permitted speed except for one or two slow-moving vehicles that limit the speed of the others. This paper is a logical extension of these situations and is devoted to deriving a formula to calculate the average speed of a traffic flow with three slow-moving vehicles. A generalisation of the obtained results will create a sound basis for deriving a formula to calculate the average speed of a dense traffic flow with any number of slow-moving vehicles. The availability of this formula can be a starting point for understanding the changes in normally distributed free-flow speed caused by a dense traffic flow.

Keywords: traffic speed, average speed, traffic flow, flow density, traffic lane, traffic conditions, analytical modelling, transport system.

INTRODUCTION

Traffic flows (TFs) in modern cities significantly load street networks, causing many transport, environmental and safety problems [1]. Important information for their solution is the main TF parameters, including speed, which is particularly important [2]. The speed variable can be considered sufficiently studied in free-flow traffic conditions, under which it is well described by normal distribution [3]. This distribution is widely used in practice – for example, when planning traffic management measures, transport engineers and researchers estimate the percentiles of a normal distribution to set speed limits or advisory speeds, determine the modal and mean speed, pace speed, etc. [4].

The statement about the normal distribution of speed in free-flowing conditions is based only on empirical data. At the same time, it does not contradict the regularities in people's behaviour during personal and social activities [5-7], which undoubtedly include the satisfaction of mobility needs. On the other hand, the behaviour of road users in TF is determined by the individual characteristics of their mind, which results in the choice of a specific speed in certain traffic conditions. At the current level of knowledge, this excludes the possibility of substantiating the type of vehicle speed distribution analytically, making statistical tests of relevant hypotheses the main way to establish this distribution and estimate its parameters.

As for vehicle speed in complicated traffic conditions, no reference distribution, which scientists and practitioners would consider universal to represent it, has been established. Therefore, the issue of forecasting the TF parameters in urban areas, which are the places of concentration of the significant number of traffic problems, remains relevant. The fundamental diagram (FD) of TF, which is based on statistical data analysis, like the aforementioned normal speed distribution, helps to solve this issue. This diagram establishes a relationship between the flow speed, density and volume [2, 8, 9] and represents all TF states in one coordinate system. At the same time, the degree to which the FD considers the processes that occur in dense TFs, causing the variation of speed and affecting its average value, requires careful analysis.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The relationship between the main TF parameters has been keeping the attention of scientists and engineers for a long time. In 1930, American scientists led by Johnson A.N., while studying highway capacity, already noted a decrease in traffic speed with an increase in traffic volume and density [10]. In 1935, Greenshields B.D. published his work presenting a linear relationship between vehicle speed and traffic density, and his linear model is still popular [11].

The next in chronology is the TF study conducted in 1965 by Greenberg H., who presented a

logarithmic relationship between speed and density [12]. His work also suggested that the speed depends only on the flow density, and TF behaviour can be described by analogy with classical fluid behaviour. At that time, the abovementioned suggestions could have helped represent the TF. Still, they cannot be considered fully justified because flow parameters depend on many factors – road surface and geometry, vehicle technical characteristics, driving style, driver's awareness of a particular road section, traffic conditions (lighting, weather, etc.) – that are not typical for the field of hydrodynamics [2, 13].

In 1965, the concept of discontinuous diagrams was established. The TF FD, which initiated this concept, was first demonstrated by the engineer and researcher Edie L.C. and represented the TF in the Holland Tunnel [14]. Edie L.C. showed that at the same traffic density, two different traffic volume values can exist on the diagram: a higher value for the flow entering the studied bottleneck and a lower value for the flow leaving it. The volume drop was explained by the difference in vehicle decelerations when approaching the bottleneck and accelerations after passing it.

Approximately in the same period, two conceptual works – the books by F.A. Haight [8] and D.R. Drew [9] – were published. They made a significant contribution to the development of the traffic flow theory. Slightly later, the book by H. Inose and T. Hamada [2] was published, and it also took a confident place in classical specialised literature.

In his book, F.A. Haight presents the FD plot, which is typical of modern research [8]. While categorically stating that any TF theory must correlate with the FD to be correct, the author also acknowledges that diagrams refer to specific places and traffic conditions and that there is controversial empirical data on the shape of the FD and the absence of a single function to represent it. F.A. Haight also attempts to find a speed distribution for the entire range of traffic conditions – from congested to free-flowing – and considers type I and type III distributions (beta and gamma families) for this purpose, taking into account that any driver cannot maintain the desired speed in the presence of other vehicles in the flow [8]. In these attempts, the author also notes that the problem of establishing a function to plot the FD can be reduced to the problem of determining the average vehicle speed as a function of the flow density. Using the mentioned distributions in the study of the movement of two vehicles – a leader and a car-follower that does not have the opportunity to overtake – the book's author tries to derive a function to represent the FD. In addition, the book considers the movements on a two-lane road with two-way traffic and overtaking opportunities to obtain the distribution of spot speeds; here, the waiting for the opportunity to overtake is perceived as a restriction on the movement, which leads to the formation of 'moving queues' [8]. These issues are studied using the queuing theory. However, using this theory raises some doubts as it is more appropriate for studying traffic controlled by traffic signals than for traffic without automatic control, where the flow parameters depend on the individual characteristics of drivers and should be determined empirically [8]. At the same time, it is worth noting that F.A. Haight's considerations on the possibility of maintaining the desired speed in the flow and the vehicle movement with no overtaking opportunities are relevant to the present and are pretty close to those that will be used in the problem statement in the current paper.

D.R. Drew's book points out that field surveys and the statistical analysis of their results are the traditional way to obtain traffic data, which is equally valid for the present time [9]. The author also emphasises the importance of speed as the traffic smoothness parameter and presents a more generalised measure for TF quality based on the average speed on a road section. The importance of the average speed value is also underlined when showing the prevalence of the use of the normal distribution to describe the speed variable [9].

In the book by H. Inose and T. Hamada, speed and other urban TF parameters are considered averaged characteristics of vehicle traffic, which is formed from vehicles having different technical specifications and randomly meeting on the network [2]. To estimate these parameters, the authors use the analogy of the TF to an incompressible fluid flow. In addition to the averaged vehicle speed presented on the FD, the book shows the derivation of the traffic speed distribution function as a weighted sum of the exponentially distributed time headway of vehicles in a free flow and the gamma-distributed (or Erlang-distributed) time headway in a dense flow [2]. The reason for using the latter distribution instead of the commonly used exponential distribution is that in dense traffic, the headways very close to zero cannot occur with high probability, as implied by the exponential distribution, because each vehicle has a non-zero length. F.A. Haight and D.R. Drew used the same headway distributions, but they did not use them to obtain the speed distribution. It is worth noting that H. Inose and T. Hamada, when considering the relationship between speed and density, assume that with increasing traffic density, drivers are forced to reduce their speed to maintain a safe distance and ensure traffic safety [2].

The research on TF FD became more extensive in the late XX and early XXI centuries. This period

showed the development of existing and new approaches to describe the scattering of data points on volume-density, speed-density, and speed-volume plots [13]. During this time, S. Smulders published an approach [15, 16], according to which the part of the speed-density graph corresponding to the free flow was plotted as a straight line while the other part showed nonlinear dependence. However, the reasons for choosing the functions that produce such a graph were not explained.

Sometime later, a work that can be considered a development of the concept of discontinuous FDs was published [17]. This work presented a diagram based on a microscopic car-following model that differentiates driver behaviour in free and congested traffic flow. The advantage of the model used is taking into account the platooning process, albeit in a simplified way, and the disadvantages are as follows: 1) the use of a constant time headway for all traffic states up to the dense flow; 2) the possibility of determining one of the model parameters only based on the assumption that the maximum speed of a dense flow is equal to the speed of the free flow with total platooning.

More recent approaches to representing the FD include a highly flexible function proposed by J.M. del Castillo. The parameters of this function can be freely adjusted to obtain almost any desired graph to fit empirical data [18, 19].

Throughout the history of research on the FD, many models have been developed to represent the relationship between TF parameters at specific locations and to study driver behaviour in certain traffic conditions [20-23]. These models are so numerous that it is almost impossible to analyse all of them. However, there is no critical need for this since all models constitute an approximation of empirical data using the least squares method [20]. All mentioned models and the approaches to develop them do not question the existence of a regular relationship between TF parameters. At the same time, none of the models explains the reasons for the undeniable regularities reflected in the scattering of data points in the FD plots, including the 'speed-density' plot. The speed-density relationship indicates a decrease in the flow speed with an increase in density. In the literature, this is explained by the fact that as the traffic becomes saturated (dense), drivers reduce their speed to ensure traffic safety, i.e., to maintain a safe distance [2]. However, the distance between vehicles is determined not only by safety reasons but also by the fact that drivers are forced to adapt their speed to the speed of the vehicles in front, and this fact is confirmed in up-to-date research [13].

This adaptation certainly affects the variation of speed and its average value. From this point of view, the speed in a dense TF, which is represented by the rightmost part of the speed-density diagram, can reasonably be considered a random variable. Such consideration is the subject of many studies [24]. A part of them indicates a normal speed distribution [24], and the other part shows the possibility of using distributions with a left-shifted mode (with right asymmetry), namely lognormal, gamma, Weibull and similar [25, 26]. At the same time, the reasons for the change in speed values as the free-flow conditions change to complicated ones are either not explained or reduced to the heterogeneity of the traffic composition [26]. The latter explanation cannot be considered sufficient because the vehicle speed in a dense TF is not always explicitly determined by the vehicle type but formed by many random factors, the contribution of which is quite challenging to assess.

Therefore, a situation arises when the distribution of speed values located in the leftmost part of the speed-density diagram is known – it is a normal distribution, and the distribution of speeds concentrated in the rightmost part of the diagram is somewhat uncertain. To study the latter distribution, it is reasonable to examine the process of forming the average vehicle speed value, and the great attention to this parameter in the analysed literature supports this way of study. It is rational to develop such a study by considering practically possible situations of vehicle movement in dense traffic and a logical description of the processes that occur in the flow.

AIM AND TASKS

One of the reasons for the increase in traffic density on road network sections is that there are no alternative trajectories for drivers to pass those sections without interruptions. The change of TF state from free to dense can be reasoned by various situations, which are often the result of permanent or temporary traffic management measures or specific traffic conditions at certain road sections. These situations frequently occur in urban areas when a carriageway is narrowed to a single lane for heavy traffic and when vehicles leaving a signalised intersection enter a road section with only one lane available for traffic. These situations can also be caused by curb parking. In both mentioned situations, drivers are limited in their manoeuvrability and forced to follow slow-moving vehicles (SVs) until they can overtake these SVs travelling at a speed lower than the desired speed for others. Travelling at the speed limited by the vehicle in front divides the vehicle platoon into smaller platoons led by SVs. This creates the conditions for formalising

the processes in the flow and deriving the dependence of the average flow speed on the speed of individual traffic participants under their strong influence on each other.

Both of the situations mentioned above – a carriageway narrowed to one lane and a signalised entry to a road section with only one lane available for traffic – are similar in terms of traffic conditions [24] since, quite often, vehicles start at a particular place from zero speed (from rest), enter a one-lane section and then form a platoon. The vehicles in this platoon can reach the desired speed or the speed prescribed by traffic rules. In the case of a signalised entrance to a road section, the start from rest is obvious, and the same conditions also arise in the case of a narrowed carriageway since the vehicles can only hypothetically enter such a carriageway without any stops [27]. Therefore, the condition of starting from rest and entering a one-lane section stipulates the need to estimate the average platoon speed at the exit from the section. To be correctly stated, the problem of determining the average speed in the listed situations should be considered for the one-lane sections having a length sufficient for the acceleration of the vehicles up to the desired speed (close or equal to the permitted speed) in traffic conditions which are free-flowing except for no overtaking opportunities. In other words, the average speed of the vehicles should be estimated at such a distance from the place of platoon formation that would allow all vehicles, which are not retarded by slow-moving traffic participants in the platoon, to attain the desired speed.

This paper deals with the task of determining the flow speed under conditions of strong interaction between traffic participants, which suggests obtaining the formula to calculate the average speed of the vehicles of the same type that would move at different speeds in free-flow conditions at the exit from a one-lane road section where overtaking is impossible. The search for this formula was started in papers [28] and [29], which considered the simplest situations of a dense platoon, in which all drivers want to travel at the same maximum permitted speed, except for (i) one slow-moving vehicle (SV) and (ii) two SVs that limit the speed of the others. The current paper is a logical continuation of this search. It is devoted to deriving the formula for the average vehicle speed in the case of three SVs in a platoon.

RESEARCH RESULTS

The presence of not one or two but three SVs in a TF is the next difficult task of estimating the average vehicle speed at the exit from a lane with no overtaking opportunities. To address this task, it is reasonable to formalise it in the following way:

- let N vehicles, the number of which is more than three ($N > 3$) and which drive in a dense flow, randomly enter a road section with one lane and no overtaking opportunities. Let the numbering of vehicle positions in the platoon formed at the section starts from 0. Then, under equal probability for each vehicle to take any position x in the platoon, each vehicle can have number $[0; N - 1]$ (i.e., $x \in [0; N - 1]$) with probability $1/N$;

- let all but three drivers want to drive at the maximum permitted speed V_{\max} ;

- let the driver of the first SV (SV1) travels at speed V_s , $0 < V_s < V_{\max}$, the driver of the second SV (SV2) travels at speed V_2 , $V_s < V_2 < V_{\max}$, and the driver of the third SV (SV3) travels at speed V_3 , $V_2 < V_3 < V_{\max}$;

- let $\Delta_s = (V_{\max} - V_s)$ be the deviation of SV1's speed from the maximum permitted speed, $\Delta_2 = (V_2 - V_s)$ be the deviation of SV2's speed from the SV1's speed (the speed of the slowest vehicle), and $\Delta_3 = (V_3 - V_s)$ be the deviation of SV3's speed from the SV1's speed.

Before proceeding to the derivation of the formula for the average speed of the flow with three SVs at the exit from a lane with no overtaking opportunities, it is necessary to briefly summarise the results of considering a flow with one and two SVs presented in papers [28] and [29], respectively. In the presence of only one SV in the TF, the average vehicle speed under equal probability of SV to take any position x in the platoon was determined as

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \bar{V}_x = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} (x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s), \quad (1)$$

where x is the in-flow position of the single SV which drives at speed V_s ;

\bar{V}_x is the average speed of the vehicles in the flow when the single SV takes position x with probability $1/N$;

$[x \cdot V_{\max} + (N-x) \cdot V_s]$ is the sum of the speeds of all vehicles in the flow when the single SV takes position x .

After mathematical transformations made in paper [28] taking into account designation for Δ_s , the following formula was obtained to calculate the average speed of the flow with a single SV on a lane with no overtaking opportunities:

$$\bar{V} = V_s + \frac{N-1}{2N} \Delta_s. \quad (2)$$

Based on this, the case with two SVs in the flow was considered in paper [29]. It was taken into account that SV2, having the speed V_2 , may take position x ahead of SV1 with probability $1/N$. For the case of two SVs in the flow, it was found that for $(N-x-1)$ vehicles behind position x in the TF, the above situation with one SV occurs, but with a maximum speed equal to V_2 . The equation for the average speed of these vehicles \bar{V}_x , where x denotes the SV2's position in the flow, was derived taking into account Eq. (2) and the number of vehicles behind the position x [29]:

$$\bar{V}_x = V_s + \frac{N-x-2}{2(N-x-1)} \Delta_2. \quad (3)$$

Then, by analogy with Eq. (1), the following equation for the average flow speed, which considers all possible positions of two SVs among N vehicles, was written:

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \bar{V}_1 + \frac{1}{2} \bar{V}_2, \quad (4)$$

where the terms represent the average vehicle speed which takes into account the possibility of a SV to take the position $x \in [0; N-2]$ in the flow (the presence of two SVs reduces the number of possible positions for each of them to $(N-2) - \bar{V}_1$ is the average speed if SV1 takes the position x , and \bar{V}_2 is if the SV2 [29].

After determining the total number of situations when SV1 can take the position ahead of SV2, the formula for \bar{V}_1 for the case of two SVs in the flow was obtained: $\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-2}{3}$. Then, using Eq. (3), the sum of speeds of all vehicles in the flow when SV2 takes position x ahead of SV1 was written down:

$$x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x. \quad (5)$$

Based on this sum, the formula for \bar{V}_2 for the case of two SVs in the flow was derived:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \left(1 + \frac{N-2}{3}\right) [29].$$

Substituting the obtained equations for \bar{V}_1 and \bar{V}_2 into Eq. (4) allowed for deriving the formula for the average speed of a dense flow with two SVs at the exit from a single-lane road section with no overtaking opportunities [29]:

$$\bar{V} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-2}{3} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \frac{N+1}{3}. \quad (6)$$

The briefly presented results of previous studies of simpler cases with a smaller number of SVs in the flow [28, 29] are the necessary material to proceed to the subject of this paper, namely the consideration of the case with three SVs in the TF.

Since overtaking on the considered road section is impossible, in the case of three SVs, the speed of $(N-3)$ vehicles, which want to travel at speed V_{\max} , depends on which SV they follow. If they follow the

SV1, they will exit the one-lane road section at speed V_s ; if they follow SV2, they will exit at speed V_2 ; if they follow SV3, they will exit at speed V_3 ; and vehicles ahead of all the SVs will exit at speed V_{max} . Obviously, the flow speed depends on the order of vehicles in it and the total number of possible vehicle orders in the flow is $N!$. According to the task stated, it is necessary to determine the average speed of vehicles at the exit from a one-lane road section with no overtaking opportunities, which considers all possible vehicle permutations in the flow.

The probability of the event that one of the three SVs takes the position x in the flow under a single realisation of the random order of vehicles is equal to $3/N$, and the probability that each of the three SVs takes the position x is the same for all SVs and equals to $1/N$. Under an equal probability of all vehicle orders in the flow, each vehicle will take the position x exactly $(N-1)!$ times, i.e., the variants for positioning of SVs are invariant with respect to the SV's number. However, the speed of the vehicle flow on the lane with no overtaking opportunities is completely determined by the order of vehicles, and to calculate the average speed for the entire flow, it is essential to take into account not so much the position of one of the three SVs as its location relative to other SVs. To consider this aspect, it is reasonable to divide the entire set of vehicle orders in the flow into subsets in which one of the SVs drives ahead of the other SVs. Since all orders are invariant with respect to the SVs' numbers, the quantity of situations in which SV1 (the slowest vehicle) is ahead of the other SVs is equal to the number of situations in which SV2 or SV3 is ahead. Therefore, by analogy with Eq. (1) and concerning Eq. (4) and the introduced designations, it is possible to write down the equation for the average flow speed, which considers all possible variants of the relative position of three SVs among N vehicles:

$$\bar{V} = \frac{1}{3}\bar{V}_1 + \frac{1}{3}\bar{V}_2 + \frac{1}{3}\bar{V}_3, \tag{7}$$

where $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ represent the average flow speed when SV1, SV2 or SV3 is ahead of the other SVs, respectively.

If SV1 travelling at speed V_s takes position x in the flow ahead of SV2 and SV3 (Fig. 1), the average flow speed at the exit from a lane will be the same as in the case of a single SV in the TF. It can be determined using Eq. (2). The number of these situations in the full set of vehicle permutations is equal to $N!/3$, and the probability of this event is equal to $1/3$. At that, the number of positions available for SV1 is reduced to the first $(N-2)$ positions in the platoon since SV2 and SV3 must necessarily be behind SV1.

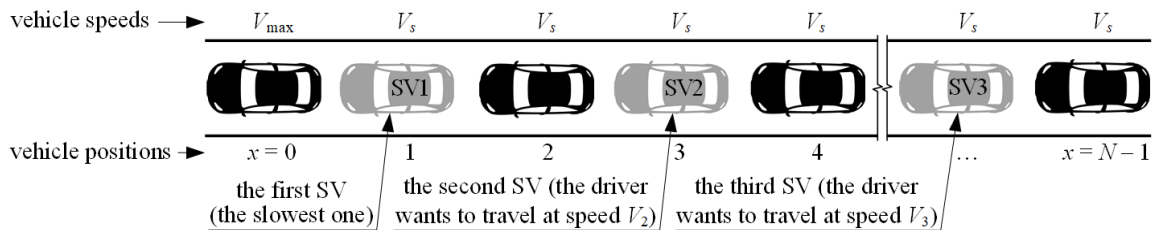


Figure 1 – Traffic flow with three SVs when the slowest one takes a position ahead of the other SVs

With the same probability $1/3$, both SV2, which wants to drive at speed V_2 , and SV3, which wants to drive at speed V_3 , can take position x ahead of the SV1.

If SV2 is ahead of the other SVs, then all vehicles ahead of it will drive at the maximum permitted speed V_{max} , SV2 will drive at speed V_2 , and the vehicles behind it will either drive at speed V_2 if there is no SV1 ahead of them (Fig. 2a) or at minimum speed V_s otherwise (Fig. 2b). A similar situation for a full set of N vehicles with the same speeds has already been studied in paper [29] and represented by Eq. (6), but in the situation under consideration in the current paper – when there are three SVs in the flow – the sum limit will depend on the position of SV2 in the flow.

If SV3, travelling at speed V_3 , will take the position x in the flow ahead of the two slowest SVs, then all vehicles ahead of it will drive at maximum permitted speed V_{max} , SV3 will drive at speed V_3 , and the

vehicles behind it will drive at speed V_3 if there are no two slowest SVs ahead of them. If, however, one of the two slowest SVs is ahead of them, they will either drive at speed V_2 if SV2 travels in the tail of the platoon behind SV3 and ahead of the SV1 (Fig. 3a) or at speed V_s if in the tail of the platoon (behind SV3) SV1 travels ahead of the SV2 (Fig. 3b).

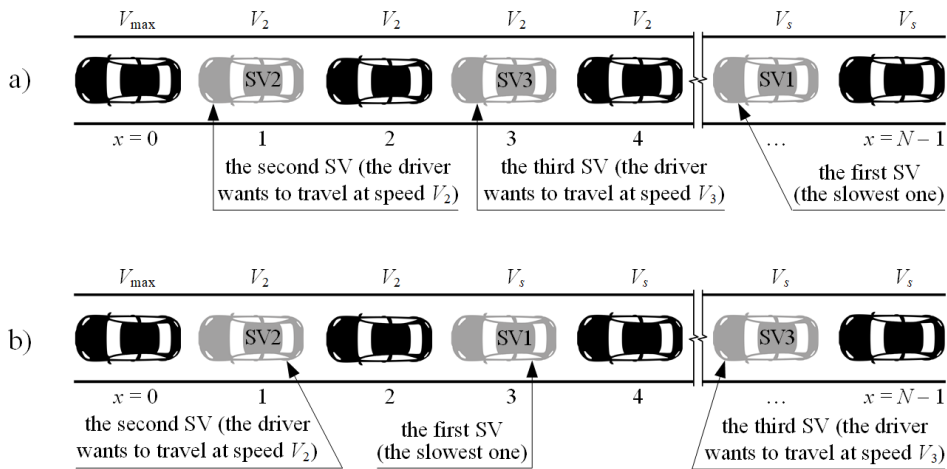


Figure 2 – Traffic flow with three SVs when SV2 takes the position ahead of the other SVs: a) the fastest SV is ahead of the slowest one; b) the slowest SV is ahead of the fastest one

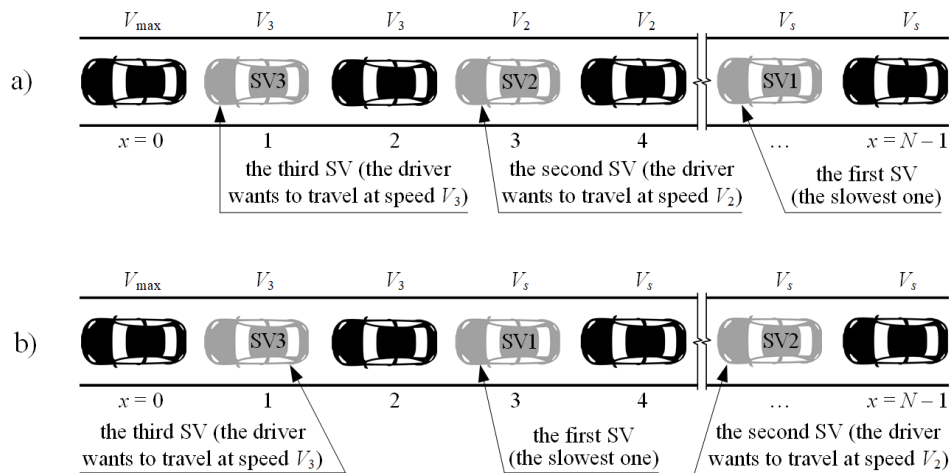


Figure 3 – Traffic flow with three SVs when the fastest one takes the position ahead of the other SVs: a) SV2 is in the tail of the platoon and ahead of the slowest SV; b) the slowest SV is in the tail of the platoon and ahead of SV2

Now, the average flow speed under different SV positions in the TF presented in Figs. 1-3 should be considered in detail. It is logical to start this process by deducing the analytic dependence for \bar{V}_1 in Eq. (7). At the beginning, it is appropriate to mention that the mandatory presence of two other SVs behind SV1, whether even slower or potentially faster, means that not all of N , but only first $(N-2)$ positions in the flow are available to SV1. Taking this into account, for each x -th position of SV1 in the flow, it is necessary to determine the number of situations when it takes that position, given that the other two SVs follow it. The total number of situations when SV1 can take each position in the flow without the condition of the mandatory presence of two other SVs behind it is known and is equal to

$$\frac{N!}{N} = (N-1)!, \tag{8}$$

i.e., the number of permutations of all other vehicles – fast and slow – regardless of the value of x . The dependence of the sought number of situations on the position of SV1 arises precisely from the condition of its location ahead of the other SVs.

In the first position ($x=0$), this condition is met automatically, and the number of situations when SV1 can take this position is always equal to Eq. (8).

As for the general case of taking the x -th position by SV1, it should be considered that the number of positions in the flow available to two other SVs following the SV1 is equal to $Q=(N-1-x)$. The number of variants for placing these two SVs on those available positions is equal to [30, 31]

$$A(Q,2) = \frac{Q!}{(Q-2)!} = Q \cdot (Q-1) = (N-1-x) \cdot (N-2-x).$$

At that, the fast vehicles (FVs) can take $(N-3)$ remaining positions, and the total number of variants for placing them in the TF equals $(N-3)!$. Consequently, according to the combinatorial rule of product [30, 31], the total number of situations when SV1 can take the position ahead of the other SVs is determined by the expression $(N-1-x) \cdot (N-2-x) \cdot (N-3)!$. The correctness of this expression is confirmed by the fact that under $x=0$, it transforms to the right side of Eq. (8). Also, under $x=(N-2)$ or $x=(N-1)$, the obtained expression results in 0, which is logical since in this case, there will be no available positions for placing two other SVs.

Using these findings, the following equation for \bar{V}_1 can be written down:

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-3)! \cdot \frac{(x \cdot [V_s + \Delta_s] + [N-x] \cdot V_s)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-3)!},$$

In the numerator and denominator of this formula, it is reasonable to take the multipliers $(N-3)!$, which do not depend on the summation index, out beyond the summation sign and cancel them. After this cancellation, the presented formula will look as follows:

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{(x \cdot [V_s + \Delta_s] + [N-x] \cdot V_s)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \quad (9)$$

where $(N-2-x) \cdot (N-1-x)$ can be considered the component that regards the number of situations when SV1 in a flow of N vehicles occurs in the position x and ahead of the other two SVs.

Eq. (9) represents the average speed of all vehicles in the flow, weighted by the number of situations when SV1 takes the position ahead of the other SVs. After the collection of like terms, Eq. (9) can be simplified to

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{(x \cdot \Delta_s + N \cdot V_s)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}.$$

Dividing the parenthetical expression $(x \cdot \Delta_s + N \cdot V_s)$ on the right of the numerator into two separate terms – $x \cdot \Delta_s$ and $N \cdot V_s$ – allows for taking the speed V_s and the multiplier at x out beyond the summation sign since the weighted average of the constant is equal to the constant itself and the mentioned multiplier does not depend on the summation index:

$$\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}. \quad (10)$$

The multiplier at $\frac{\Delta_s}{N}$ can be simplified by removing the brackets in its numerator and denominator and applying the formulas for the sum of series $\sum_{x=1}^m x = \frac{m \cdot (m+1)}{2}$, $\sum_{x=1}^m x^2 = \frac{m \cdot (m+1) \cdot (2 \cdot m+1)}{6}$ and $\sum_{x=1}^m x^3 = \left(\frac{m \cdot (m+1)}{2}\right)^2$ [30]. Putting a zero term under the summation sign in these formulas, which will not change the sum totals since this term will be equal to zero, and substituting $m = (N-3)$ to bring the sum limit into compliance with the one used in Eq. (10) allows for obtaining the following:

$$\sum_{x=0}^{N-3} x = \frac{(N-3) \cdot (N-2)}{2}, \quad (11)$$

$$\sum_{x=0}^{N-3} x^2 = \frac{(N-3) \cdot (N-2) \cdot (2 \cdot N-5)}{6}, \quad (12)$$

$$\sum_{x=0}^{N-3} x^3 = \left(\frac{(N-3) \cdot (N-2)}{2}\right)^2 = \frac{(N-3)^2 \cdot (N-2)^2}{4}. \quad (13)$$

Removing the brackets in the numerator of the multiplier at $\frac{\Delta_s}{N}$ in Eq. (10) and collecting like terms results in

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x &= \sum_{x=0}^{N-3} x \cdot [(N^2 - 3 \cdot N + 2) - x \cdot (2 \cdot N - 3) + x^2] = \\ &= (N^2 - 3 \cdot N + 2) \cdot \sum_{x=0}^{N-3} x - (2 \cdot N - 3) \cdot \sum_{x=0}^{N-3} x^2 + \sum_{x=0}^{N-3} x^3. \end{aligned} \quad (14)$$

Substituting Eqs. (11)-(13) into Eq. (14) allows for simplifying this numerator as follows

$$\begin{aligned} (N^2 - 3 \cdot N + 2) \cdot \frac{(N-3) \cdot (N-2)}{2} - (2 \cdot N - 3) \cdot \frac{(N-3) \cdot (N-2) \cdot (2 \cdot N - 5)}{6} + \frac{(N-3)^2 \cdot (N-2)^2}{4} = \\ = \frac{N \cdot (N^3 - 6 \cdot N^2 + 11 \cdot N - 6)}{12} = \frac{N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot (N-3)}{12}. \end{aligned} \quad (15)$$

Removing the brackets in the denominator of the multiplier at $\frac{\Delta_s}{N}$ in Eq. (10) and collecting like terms results in

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) &= \sum_{x=0}^{N-3} [(N^2 - 3 \cdot N + 2) - x \cdot (2 \cdot N - 3) + x^2] = \\ &= (N^2 - 3 \cdot N + 2) \cdot \sum_{x=0}^{N-3} 1 - (2 \cdot N - 3) \cdot \sum_{x=0}^{N-3} x + \sum_{x=0}^{N-3} x^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Substituting Eqs. (11), (12) and $\sum_{x=0}^{N-3} 1 = 1 \cdot [(N-3) - 0 + 1] = (N-2)$ [30] into Eq. (16) allows for simplifying this denominator as follows

$$\begin{aligned} (N^2 - 3 \cdot N + 2) \cdot (N-2) - (2 \cdot N - 3) \cdot \frac{(N-3) \cdot (N-2)}{2} + \frac{(N-3) \cdot (N-2) \cdot (2 \cdot N - 5)}{6} = \\ = \frac{N \cdot (N^2 - 3 \cdot N + 2)}{3} = \frac{N \cdot (N-1) \cdot (N-2)}{3}. \end{aligned} \quad (17)$$

The ratio of the numerator represented by Eq. (15) to the denominator represented by Eq. (17) results in the final expression for the multiplier at $\frac{\Delta_s}{N}$ in Eq. (10), which can be simplified as follows:

$$\frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} = \frac{N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot (N-3)}{12} \cdot \frac{3}{N \cdot (N-1) \cdot (N-2)} = \frac{N-3}{4}. \quad (18)$$

Taking into account Eq. (18), the average flow speed when SV1 is ahead of the other two SVs in the TF can be finalised as follows:

$$\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4}. \quad (19)$$

The derivation of the formula for the second term in Eq. (7) is similar to the case of two SVs in a TF (Eq. (6)) since the presence of another vehicle willing to travel at a speed higher than that of SV2 does not cause any changes because that another vehicle will follow the slower vehicle and will be forced to adapt to latter's speed just as all the FVs in the flow behind SV2. However, unlike SV3, the FVs may also be ahead of SV2. So, the situation is precisely the same as in the case of two SVs in the flow, except that the sum limit must now be equal to $(N-3)$ since SV2 will always be followed by two other SVs, which also means that it cannot take two last positions in the TF. The sum of the vehicle speeds in such a flow can be written down using the number of vehicles following the first SV and their average speed determined from Eq. (3):

$$x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x.$$

In this situation, the number of vehicle orders when SV2 can be ahead of the other SVs in the flow is also can be considered through the use of expression $(N-2-x) \cdot (N-1-x)$. Then, by analogy with Eq. (9), the following equation for \bar{V}_2 can be written down:

$$\bar{V}_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x]}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}.$$

In multiplier $[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x]$, which is on the right of the numerator, the term in the middle, which contains only the constants V_s and Δ_2 , can be taken out beyond the summation sign since the weighted average of the constant is equal to this constant itself. After that, the average speed \bar{V}_x can be substituted with Eq. (3), that will result in the following:

$$\begin{aligned}
\bar{V}_2 &= \frac{V_s + \Delta_2}{N} + \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \left(x \cdot (V_s + \Delta_s) + (N-x-1) \cdot \left[V_s + \frac{N-2-x}{2 \cdot (N-x-1)} \cdot \Delta_2 \right] \right)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= \frac{V_s + \Delta_2}{N} + \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{\left(x \cdot \Delta_s + V_s \cdot (N-1) + \frac{N-2-x}{2} \cdot \Delta_2 \right)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= \frac{V_s + \Delta_2}{N} + \frac{V_s \cdot (N-1)}{N} + \frac{1}{N} \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \left(x \cdot \Delta_s + \frac{N-2-x}{2} \cdot \Delta_2 \right)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= V_s + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \left(x \cdot \Delta_s + \frac{N-2-x}{2} \cdot \Delta_2 \right)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= V_s + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{N-2-x}{2}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{N-2-x}{2}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \frac{N-2}{2}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} - \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}, \\
\bar{V}_2 &= \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{\Delta_2 \cdot (N-2)}{2 \cdot N} - \frac{\Delta_2 \cdot (N-3)}{8 \cdot N} = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \left(1 + \frac{N-2}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{N-3}{4} \right), \\
\bar{V}_2 &= \bar{V}_1 + \frac{3 \cdot \Delta_2 \cdot (N+1)}{8 \cdot N}. \tag{20}
\end{aligned}$$

The formula for the third term in Eq. (7) can be derived based on the analogy with the case of two SVs in a TF (Eq. (6)). In the situation under consideration, which is presented in Fig. 3, the case with two SVs arises for $(N-x-2)$ vehicles behind position x in the flow. The maximum speed for these $(N-x-2)$ vehicles should be taken equal to V_3 . By analogy with Eq. (5), the sum of vehicle speeds in the flow will be as follows:

$$x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_3) + (N - x - 1) \cdot \tilde{V}_x, \quad (21)$$

where \tilde{V}_x is the average speed of vehicles following the SV3 provided that it takes a position in the flow ahead of the other two SVs. The formula for this average speed (\tilde{V}_x) can be obtained from Eq. (6) by replacing N with $(N - x - 1)$ and proper changing of subscripts at designations Δ :

$$\tilde{V}_x = V_s + \frac{\Delta_3}{N - x - 1} \cdot \frac{N - x - 3}{3} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot (N - x - 1)} \cdot \left(1 + \frac{N - x - 3}{3}\right). \quad (22)$$

Unlike the case of only two SVs in a TF, to obtain the formula for \bar{V}_3 in Eq. (7), it is necessary to use the average speed of the vehicles behind SV3 represented by not the Eq. (3), but Eq. (21) divided by the number of vehicles in the flow since Eq. (21) takes into account the presence of two SVs with a speed lower than the speed of the leading SV. Given the same number of vehicle orders when SV3 can be ahead of the other SVs in the flow as in the two previous cases with other leading SV, it is possible to write down the equation for \bar{V}_3 based on the analogy with Eq. (9):

$$\bar{V}_3 = \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x) \cdot \frac{[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_3) + (N - x - 1) \cdot \tilde{V}_x]}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x)}.$$

In multiplier $[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_3) + (N - x - 1) \cdot \tilde{V}_x]$ on the right of the numerator, the term in the middle, which contains only the constants V_s and Δ_3 , can be taken out beyond the summation sign since the weighted average of the constant is equal to this constant itself. After that, average speed \tilde{V}_x can be substituted with Eq. (22), that will result in the following:

$$\bar{V}_3 = \frac{V_s + \Delta_3}{N} + \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x) \cdot \frac{[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (N - x - 1) \cdot Y]}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x)},$$

where $Y = V_s + \frac{\Delta_3}{N - x - 1} \cdot \frac{N - x - 3}{3} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot (N - x - 1)} \cdot \left(1 + \frac{N - x - 3}{3}\right).$

Removing the inner brackets in expression $[x \cdot (V_s + \Delta_s) + (N - x - 1) \cdot Y]$ in the numerator allows for eliminating the repetition of the value of the speed of SV1 in the flow:

$$\bar{V}_3 = \frac{V_s + \Delta_3}{N} + \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x) \cdot \frac{\left(x \cdot \Delta_s + [N - 1] \cdot V_s + \frac{\Delta_3 \cdot (N - x - 3)}{3} + \frac{\Delta_2}{2} + \frac{\Delta_2}{2} \cdot \frac{N - x - 3}{3}\right)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-3} (N - 2 - x) \cdot (N - 1 - x)}.$$

After that, it is possible to take out the constants that do not depend on the summation index beyond the summation sign:

$$\bar{V}_3 = \frac{V_s + \Delta_3}{N} + \frac{[N-1] \cdot V_s}{N} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} + \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot \left(x \cdot \Delta_s + \frac{\Delta_3 \cdot (N-x-3)}{3} + \frac{\Delta_2 \cdot (N-x-3)}{2} \right)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}.$$

Now, it is possible to divide the large fraction in the numerator into several terms:

$$\begin{aligned} \bar{V}_3 = & V_s + \frac{\Delta_3}{N} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} + \frac{\Delta_3}{3 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-x-3)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} + \\ & + \frac{\Delta_2}{6 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-x-3)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}. \end{aligned}$$

The simplification of the first fraction among those showing the ratio of the sums is presented in Eq. (18), and the following fractions of this type can be factorised to extract index x :

$$\begin{aligned} \bar{V}_3 = & V_s + \frac{\Delta_3}{N} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4} + \\ & + \frac{\Delta_3}{3 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-3)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} - \frac{\Delta_3}{3 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} + \\ & + \frac{\Delta_2}{6 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot (N-3)}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)} - \frac{\Delta_2}{6 \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-3} (N-2-x) \cdot (N-1-x)}. \end{aligned}$$

Based on Eq. (18) and the fact that certain sums contain an index-independent value $(N-3)$, it is possible to simplify these sums as follows:

$$\bar{V}_3 = V_s + \frac{\Delta_3}{N} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_3 \cdot (N-3)}{3N} - \frac{\Delta_3}{3 \cdot N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_2 \cdot (N-3)}{6 \cdot N} - \frac{\Delta_2}{6 \cdot N} \cdot \frac{N-3}{4}.$$

Now, it is reasonable to rearrange the terms in the following way:

$$\bar{V}_3 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} + \frac{\Delta_2 \cdot (N-3)}{6 \cdot N} - \frac{\Delta_2}{6 \cdot N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_3}{N} + \frac{\Delta_3 \cdot (N-3)}{3 \cdot N} - \frac{\Delta_3}{3 \cdot N} \cdot \frac{N-3}{4}.$$

After that, proper terms can be substituted with \bar{V}_1 from Eq. (19), and the equation for \bar{V}_3 can be finalised as follows:

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \left(1 + \frac{N-3}{3} - \frac{N-3}{12} \right) + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \left(1 + \frac{N-3}{3} - \frac{N-3}{12} \right) = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \left(1 + \frac{N-3}{4} \right) + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \left(1 + \frac{N-3}{4} \right).$$

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \frac{N+1}{4} + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \frac{N+1}{4}. \quad (23)$$

Thus, all the terms in Eq. (7) are deduced – these are Eqs. (19), (20), (23) representing the flow speed in situations when SV1, SV2, and SV3 take a position ahead of the other SVs. After the substitution of these equations into Eq. (7), the latter one takes the following form:

$$\bar{V} = \frac{1}{3} \cdot \bar{V}_1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\bar{V}_1 + \frac{3 \cdot \Delta_2 \cdot (N+1)}{8 \cdot N} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{2 \cdot N} \cdot \frac{N+1}{4} + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \frac{N+1}{4} \right).$$

This substitution allows for finalising the formula for the average speed of a dense TF with three SVs:

$$\bar{V} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \frac{N+1}{6} + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \frac{N+1}{12}. \quad (24)$$

This formula establishes the dependence of the average speed of the vehicles at the exit from a one-lane road section with no overtaking opportunities from the total number of these vehicles in the flow (platoon) and the speed of the three SVs.

DISCUSSION

The initial analysis of the formula in Eq. (24) indicates that with the increase in N , there is an increase in the influence of the second term in Eq. (24), which represents the contribution of the slowest vehicle to the average flow speed and a decrease in the influence of subsequent terms which reflect the contribution of the other SVs, Fig. 4.

This means that additional SVs moving at speeds above V_s have an effect on the average speed, which is less than that of the slowest SV, and the closer the speed of additional SVs to V_{\max} , the lower the effect. This effect can be characterised as follows: when $N \rightarrow \infty$, the average platoon speed will not exceed V_s by more than $(\Delta_s/4 + \Delta_2/6 + \Delta_3/12)$.

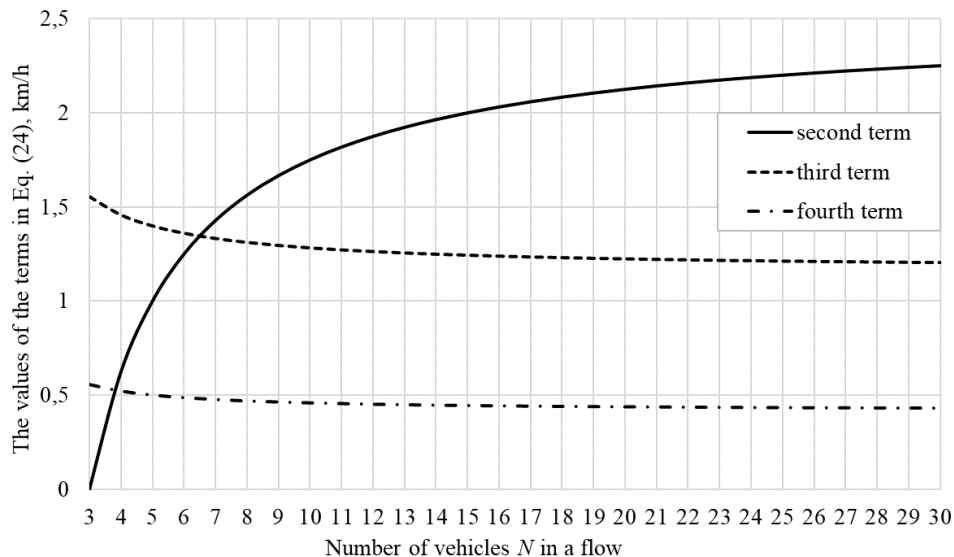


Figure 4 – Influence of the terms in the formula for the average speed of a dense TF with three SVs at different total number of vehicles in the flow (example for $\Delta_s = 10$ km/h, $\Delta_2 = 7$ km/h, $\Delta_3 = 5$ km/h)

It is also worth noting that when $N \rightarrow \infty$, the coefficients at terms $\Delta_s, \Delta_2, \Delta_3$ in Eq. (24) follow the reciprocals of the rectangular (pronic) numbers ($1/4 = 1/2 \cdot 1/2$, $1/6$, $1/12$) [30, 31]. They can be interpreted as a characteristic of a gradual tangible decrease in the contribution of each subsequent SV to the average TF speed \bar{V} . This may mean that the SVs have a regular influence on the average flow speed since the infinite

series of the reciprocals of the rectangular numbers sums to 1 ($\sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{q \cdot (q+1)} = 1$ [30, 31]) just as the sum of the probabilities of random variable values.

CONCLUSIONS

One of the widely used tools to forecast urban TF parameters for engineering and scientific purposes is a FD of TF, which is based on statistical analysis of empirical data and their approximation with the most convenient and, whenever possible, simple functions. Many functions have been fitted to represent the FD but none clarifies the regularities reflected in the scattering of data points in the diagrams. This scattering also applies to the speed-density diagram, which indicates a decrease in speed with an increase in density. The results of studying the speed as a random variable also make a little contribution to clarification of these regularities and allow for concluding that the distribution of speed values plotted in the leftmost part of the speed-density diagram is known – this is a normal distribution which is beyond question in the scientific and engineering community – and the distribution of speeds plotted in the rightmost part of the diagram is characterised by ambiguity. To study the latter distribution, it is reasonable to carefully examine the process of forming the average vehicle speed value and consider practically possible situations of vehicle movement in a dense TF. Corresponding research has already been started in papers [28] and [29], which consider a dense platoon of vehicles, where all vehicles are willing to drive at the same maximum permitted speed except for one and two SVs that limit the speed of the others.

The current paper extends the mentioned research and presents the formula for calculating the average speed of a platoon, where three SVs limit the speed of other drivers who would drive faster in free-flowing conditions. Taken together, this provides a sound basis for generalising the obtained formulas to derive a formula for calculating the average speed of a TF with any number of SVs. Knowledge of this formula will be a starting point for understanding the change in the average value of the normally distributed free-flow speed caused by the increase in TF density and the corresponding complication of traffic conditions.

REFERENCES

1. Vuchic V.R. *Transportation for Livable Cities*. Abingdon: Routledge, 2017. 376 p.
2. Inose H., Hamada T. *Road Traffic Control*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1975. 331 p.
3. Khan J.A., Tarry S.R. Speed spot study by comparing time mean speed and space mean speed: A case study. *International Journal of Advanced Science and Research*. 2018. Vol. 3(1). P. 97–102. URL: <https://www.allsciencejournal.com/assets/archives/2018/vol3issue1/3-1-59-588.pdf> (last accessed: 09.04.2025).
4. Garber N.J., Hoel L.A. *Traffic and Highway Engineering* : 4th ed. Toronto: Cengage Learning, 2009. 1249 p.
5. Cardinal L.J. Central tendency and variability in biological systems: Part 2. *Journal of Community Hospital Internal Medicine Perspectives*. 2015. Vol. 5. Article No 28972. DOI: <http://dx.doi.org/10.3402/jchimp.v5.28972>.
6. Healey J.F. *Statistics: A Tool for Social Research* : 9th ed. Belmont, CA: Wadsworth, Cengage Learning, 2010. 563 p.
7. Montgomery D.C., Runger G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers* : 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2003. 976 p.
8. Haight F.A. *Mathematical Theories of Traffic Flow*. New York: Academic Press, 1963. 241 p.
9. Drew D.R. *Traffic flow theory and control*. New York: McGraw-Hill, 1968. 467 p.
10. Johnson A.N. Traffic Capacity. *Highway Research Board Proceedings*. 1931. Vol 10. P. 218–224. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/10/10-013.pdf> (last accessed: 09.04.2025).
11. Greenshields B.D. A Study of Traffic Capacity. *Highway Research Board Proceedings*. 1935. Vol 14. P. 448–477. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/14/14P1-023.pdf> (last accessed: 09.04.2025).
12. Greenberg H. An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research*. 1959. Vol 7, No 1. P. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.7.1.79>.
13. Hoogendoorn S.P. *Traffic Flow Theory and Simulation* : Course book vk4821. Delft: Delft University of Technology, 2023. 288 p. URL: <https://ocw.tudelft.nl/courses/traffic-flow-theory-simulation/?view=readings>.
14. Edie L.C. Discussion of traffic stream measurements and definitions. *Theory of Traffic Flow* : Proceedings of the 2nd International Symposium, London, 25-27 June 1963. New York: Port of New York Authority, 1963. P. 139–154.

15. Smulders S. Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1990. Vol. 24, Issue 2. P. 111–132. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(90\)90023-R](https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90023-R).
16. Jeroen P.T., van der Gun A.J., van Arem P., van Arem B. The link transmission model with variable fundamental diagrams and initial conditions. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2019. Vol. 7(1), P. 834–864. DOI: <https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1517060>.
17. Wu N. A new approach for modeling of Fundamental Diagrams. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2002. Vol. 36(10). P. 867–884. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(01\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00043-X).
18. del Castillo J. M. Three new models for the flow-density relationship: derivation and testing for freeway and urban data. *Transportmetrica*. 2012. Vol. 8, Issue 6. P. 443–465. DOI: <https://doi.org/10.1080/18128602.2011.556680>.
19. Coullon J., Pokern Y. Markov chain Monte Carlo for a hyperbolic Bayesian inverse problem in traffic flow modeling. *Data-Centric Engineering*. 2022. Vol. 3. P. e4-1–e4-23. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2022.3>.
20. Bramich D.M., Menéndez M., Ambühl L. Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, No. 9. P. 14104–14127. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3142255>.
21. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху. *Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура*. 2018. Вип. 140. С. 91–97. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/48940/1/5149-10226-1-SM.pdf>. (дата звернення: 09.04.2025).
22. Капінус С.В. Розробка моделей прийняття рішень у системах управління дорожнім рухом : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.22.01 / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2018. 22 с.
23. Пустюльга С., Придюк В., Самостян В. Багатовимірні геометрична модель функціонування транспортного потоку на перевантаженій ділянці дорожньої мережі. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. Вип. 1(12). С. 135–145. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.66>.
24. Ву Дик Мінь. Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра філософії: 275 Транспортні технології (за видами) / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2021. 205 с.
25. Sarkar D.R., Kumar P. An investigation of traffic speed distributions for uninterrupted flow at blackspot locations in a mixed traffic environment. *IATSS Research*. 2024. Vol. 48, Issue 2. P. 180–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.03.004>.
26. Mondal S., Gupta A. Speed distribution for interrupted flow facility under mixed traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. Vol. 570. Paper No. 125798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125798>.
27. Горбачов П.Ф., Пронін С.В., Чижик В.М., Токмиленко Т.Т. Дослідження пропускної спроможності смуги руху автомобільної дороги при русі без обгонів. *Подільський вісник*. 2023. Вип. 4(41). С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.5>.
28. Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з одним повільним автомобілем на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23). С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1526>.
29. Horbachov P., Svichynskiy S. The average vehicle speed in a dense traffic flow with two slow-moving vehicles on a road section with limited manoeuvring opportunities. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2025. № 1(24). P. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1707>.
30. Stewart J. *Calculus* : 7th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2012. 1368 p.
31. Diefenderfer C.L., Nelsen R.B. *The Calculus Collection: A Resource for AP and Beyond (Classroom Resource Materials)*. Washington, DC: Mathematical Association of America, 2010. 528 p.

Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з трьома повільними автомобілями на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування

Прогнозування характеристик міських транспортних потоків залишається серед актуальних задач для науковців і практиків по всьому світу. Вирішити її допомагає фундаментальна діаграма

транспортного потоку, яка являє собою статистично встановлений зв'язок між його параметрами, зокрема, між швидкістю і щільністю. Фундаментальна діаграма показує зниження швидкості потоку зі збільшенням його щільності, і серед пояснень цьому є вимушене підлаштування водіїв під швидкість повільніших автомобілів попереду. Це безумовно впливає на коливання швидкості і вказує на доцільність її розгляду як випадкової величини зі своїм середнім значенням та розподілом при різних умовах руху. Для вільного потоку загально визнаним є нормальний розподіл швидкостей транспортних засобів, в той час як питання про те, який розподіл використовувати для опису швидкостей у щільному потоці, залишається відкритим. Поточне дослідження є внеском у прояснення даного питання і вибудоване навколо процесу формування середнього значення швидкості однотипних транспортних засобів у найбільш щільному транспортному потоці на ділянці дороги, де неможливі обгони і випередження. Пошук цього середнього значення був розпочатий з розгляду найпростіших ситуацій руху пачки автомобілів, де всі автомобілі бажають їхати з однаковою найбільшою незабороненою швидкістю, окрім одного та двох ПА, які обмежують швидкість інших. Дана стаття є їх логічним продовженням і присвячена отриманню формули для розрахунку середньої швидкості транспортного потоку для випадку трьох повільних автомобілів у ньому. Все разом це створює ґрунтовну основу для узагальнення отриманих залежностей з метою виведення формули для розрахунку середньої швидкості потоку з будь-якою кількістю повільних автомобілів. Знання такої залежності послужить відправною точкою для розуміння спричиненої щільним потоком зміни як середнього значення, так і розподілу швидкості руху, котра у вільних умовах описується нормальним законом.

Ключові слова: швидкість руху, середня швидкість, транспортний потік, щільність потоку, смуга руху, умови руху, аналітичне моделювання, транспортна система.

ГОРБАЧОВ Петро Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

СВИЧИНСЬКИЙ Станіслав Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

Peter HORBACHOV, DSc in Transport Systems, Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

Stanislav SVICHYNSKYI, PhD in Transport Systems, Postdoctoral Researcher, Associate Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

Дата надходження статті до видання: 28.08.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1905

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

TRUCK OPERATION EFFICIENCY ASSESSMENT

The article considers the issue of truck efficiency based on the cost of freight road transportation. Two groups of component costs are analyzed in detail: 1) which directly depend on the technical characteristics of trucks (costs of fuel, lubricants and other operating materials, costs of wear and tear and restoration of automobile tires; costs of maintenance and repair); 2) which are determined by the organizational features of the functioning of the motor transport enterprise (drivers' wages, deductions for social needs, depreciation of automobile rolling stock and general economic expenses). The general structure of the cost of freight transportation by automobiles is presented as the sum of indicators that make up two groups of costs: 1) which depend on the volume of cargo; 2) which are related to the characteristics of cargo and organizational work on cargo handling. The formulas for determining the first group of costs (conditional and technical costs) are considered in detail and given, since the value of these costs makes it possible: to assess the efficiency of using vehicles in monetary terms; compare the efficiency of different brands and models of cars in monetary terms; choose the most rational fleet of automobile rolling stock; evaluate the efficiency of the operation of automobiles in various motor transport enterprises in monetary terms.

To assess the feasibility of updating the fleet of motor vehicles, it is proposed to use the value of the economic effect, which is defined as the difference in proportionally reduced annual costs.

The purpose of the article is to provide methodological recommendations to motor transport enterprises on determining the components of transport costs and assessing the feasibility of updating the motor transport rolling stock.

Keywords: cost; expenses; efficiency; profit; reliability; truck; cost price.

INTRODUCTION

Currently, in Ukraine, the fleet of commercial trucks is being updated with modern foreign models. At the same time, owners of motor transport companies choose cars, focusing on the prestige of the brand, the availability of certain models on the market, their cost, etc. But during operation it turns out that the purchased car has high operating costs compared to competitors, although it meets the requirements of the transportation process. In most cases, this is due either to vehicle failures or to the high cost of spare parts and lubricants. The efficiency of vehicle operation in commercial cargo transportation is ultimately determined by the owner's obtaining maximum profit. The amount of profit received depends on the efficiency of vehicle use and the cost of cargo transportation, which in turn depend on the amount of operating costs.

When determining the efficiency of a fleet of trucks, it is necessary to distinguish between the economic efficiency of operation and the more general concept of efficiency, which includes not only economic, but also social, environmental aspects related to the operation of vehicles [1; 2]. Currently, the efficiency of vehicle operation is functionally related to the economic efficiency, reliability and reliability of vehicles (Fig. 1).

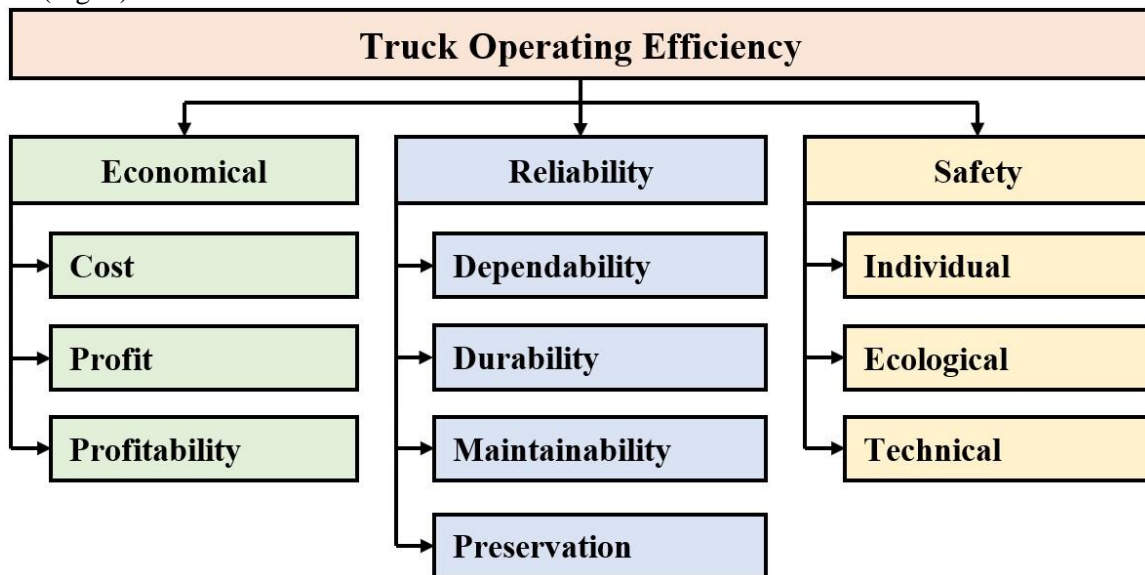


Fig. 1. Structural and functional diagram of relationships when considering the efficiency of truck operation

Given that business entities that provide road transport services, in particular in cargo transportation, pay primary attention to issues of reducing current costs (reducing the cost of transportation) and increasing the volume of services, and therefore the economic efficiency of truck operation is of paramount importance, therefore, the assessment of the efficiency of truck operation must be carried out based on the analysis of the relevant components of the cost of transportation.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The issue of the efficiency of using road transport was analyzed in their works, in particular, by such researchers as: M. G. Bosniak, V. V. Varchuk, T. P. Voloshko, V. O. Doroshchuk, V. E. Kanarchuk, V. A. Kashkanov, I. S. Klymenko, O. K. Kryvenko, M. E. Krystopchuk, O. O. Kucher, P. R. Levkovets, O. O. Lobashov, O. O. Solarev, O. V. Tatsenko, E. I. Thoruk [3–9].

The authors' research is limited to three areas: 1) finding the standardizing parameters and clarifying the indicators of transport work; 2) choosing the optimal routes for cargo transportation; 3) analyzing the technical and operational costs of enterprises when operating the existing vehicle fleet.

However, cargo transportation services are provided by motor transport enterprises, for which the primary tasks are to find ways to reduce the cost – the operating costs of vehicles, and therefore it is advisable to additionally consider the issue of determining the components of the cost of road transportation and the magnitude of the economic effect when updating the fleet of vehicles.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

Assess the efficiency of using trucks based on the components of transportation costs and the magnitude of the economic effect when updating the fleet of motor vehicles.

RESEARCH RESULTS

Increasing profits when renewing the vehicle fleet is possible as a result of increases in the productivity of the fleet, decreases in the costs of transporting goods, decreases in the number of road accidents (Fig. 2). In this case, the cargo turnover increases and (or) the cost of transportation decreases, which leads to an increase in the economic effect (and ultimately, profits) for the owner of the vehicles.

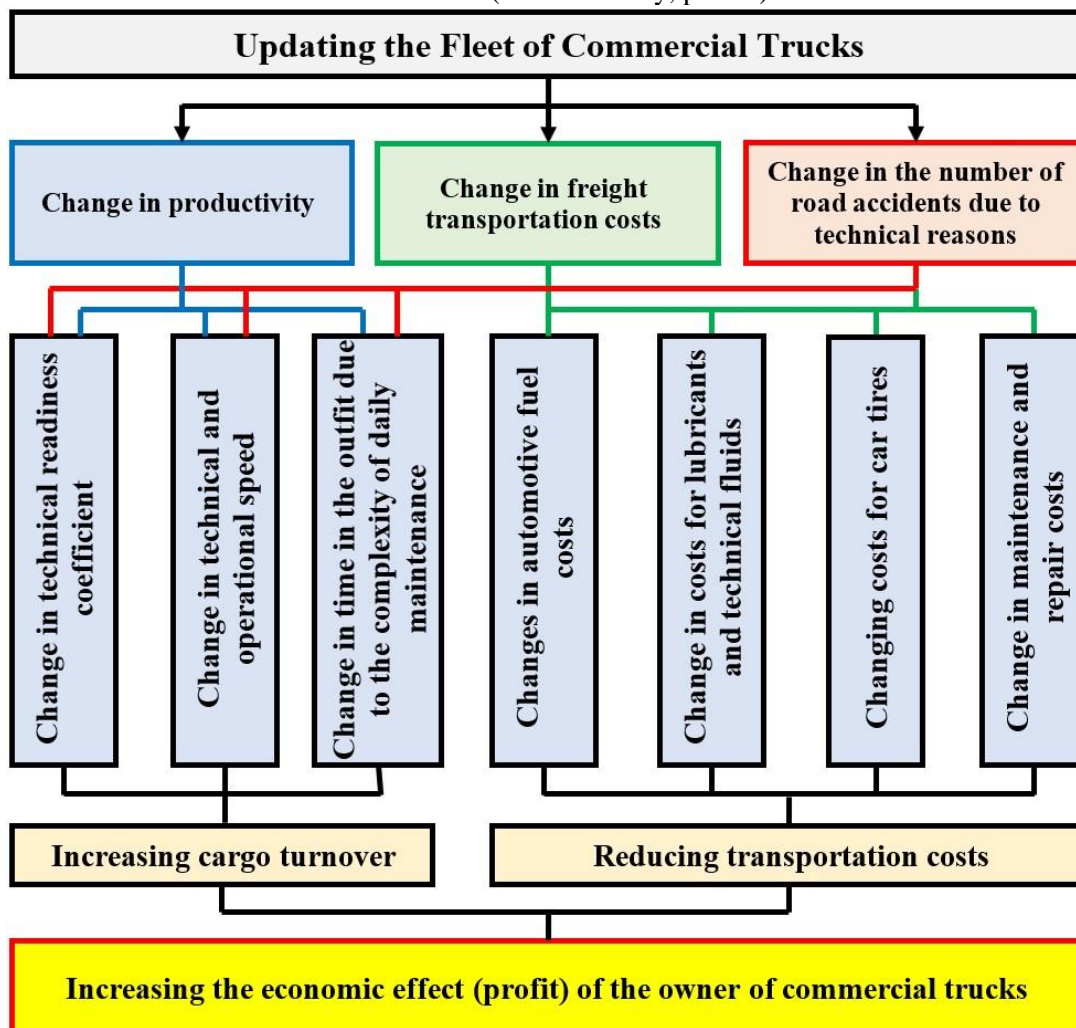


Fig. 2. Expected effect of operating trucks when renewing vehicles

When evaluating and selecting trucks, the equilibrium state of transportation is determined based on the criterion of productivity and cost of transportation [10; 11].

The cost of transportation is a component of the net profit of a motor transport company:

$$P_{net} = f(T_{ann}, S_{ann}, \Sigma TCT_{ann}), \text{UAH}, \quad (1)$$

where: T_{ann} – tariff cost of transporting annual cargo flow, UAH;

S_{ann} – annual transportation cost, UAH;

ΣTCT_{ann} – trucking company taxes, UAH.

To identify reserves for increasing the efficiency of truck operation (in this case, the profit of the rolling stock owner), we will analyze the variables that affect its value.

T_{ann} – the tariff cost of transportation of annual cargo flow, UAH, determines the gross income or revenue from the sale of services of a motor transport enterprise for the transportation of goods. The tariff cost of transportation is determined by the value of the tariff, which is the price of transportation of goods and passengers. Currently, tariffs are formed on market terms based on costs, demand and supply. Increasing the tariff for transportation in order to increase the profit of a motor transport enterprise can lead to the opposite, when customers may refuse the service in favor of competing enterprises. The positive effect of using this resource is possible only in cases where the enterprise is clearly stronger than its competitors, or there are other guarantees that give confidence in preserving the customer base of the motor transport enterprise.

S_{ann} – annual cost of transportation. To identify reserves for increasing the profit of motor transport enterprises, the structural components of cost items must be divided into two subgroups. The first includes items whose value directly depends on the technical characteristics of trucks. These are costs for fuel, lubricants and other operating materials, costs for wear and tear and restoration of automobile tires, and costs for maintenance and repair. The second group includes items whose values are determined by the organizational features of the functioning of the motor transport enterprise. These are drivers' salaries, deductions for social needs, depreciation of rolling stock and general expenses.

For finding reserves to increase the profit of a trucking company, the first group is of greatest interest, since the values of these items vary significantly depending on the type, model, and modification of trucks.

ΣTCT_{ann} – taxes of transport enterprises. Let's analyze the taxes levied by the state on transport enterprises.

Taxes are levied on gross profit: profit tax (18% of gross profit); value added tax (20%); land tax (the tax rate for land plots, the normative monetary assessment of which has been carried out, is set at no more than 3% of their normative monetary assessment).

The amount of taxes depends little on the type of rolling stock, therefore, it will change little when choosing a fleet. Thus, the analysis of the components of formula (1) showed that the only significant variable in the formation of this dependence of the profit of a motor transport enterprise when choosing the most rational fleet of vehicles is the cost of transportation S_{ann} .

The cost of transportation characterizes a wide range of factors that affect the profit of the enterprise. Let's analyze the cost items in order to identify the parameters that affect the formation of its value:

1) drivers' wages and social contributions. The value of this item is determined by the number of drivers employed in the transportation process, the form of remuneration and its value.

The number of drivers for a given volume of transportation is determined by the formula:

$$C_{drivers} = \frac{D_w \cdot d_w \cdot \alpha_T \cdot A_{lq}}{F_{dwh}}, \text{peoples}, \quad (2)$$

where: D_w – number of days of operation of the transport enterprise per year, days;

d_w – duration of the working day, hours;

α_T – coefficient of technical readiness;

A_{lq} – registered number of vehicles of the transport enterprise, units;

F_{vod} – annual fund of drivers' working hours, hours.

F_{dwh} – annual fund of working hours of drivers, hours.

As can be seen from formula 2, the number of drivers is affected by the form of organization of the transportation process and the actual number of cars used in transportation. The annual working time of drivers is determined by the number of working days and the duration of the work shift.

Social contributions amount to 27% (22% – single social contribution + 5.0% – military levy) of the salary. These indicators are of a social nature, that is, they directly determine the social component of the efficiency of car operation.

2) depreciation of rolling stock. Currently, the depreciation fund, even if it is formed, can be directed not just to restoring the value of cars, but generally to the development of the enterprise, at the request of the enterprise management; 3) automotive fuel. The cost of automotive fuel is determined by its cost and actual consumption during the operation of trucks. The cost of fuel is set in market conditions, that is, by the magnitude of demand and supply. This is a factor that is little controlled by the enterprise and little predictable, which depends on the set of processes taking place in the macroeconomics. Fuel consumption during the operation of trucks is directly determined by their technical characteristics, both technical and operational, and the technical condition of trucks. Fuel consumption is determined by the fleet, model of trucks, conditions of their operation, technical condition of vehicles, nature of transportation, rationality of transportation routes, fleet of cargo transported. Existing fuel consumption rationing methods take into account all these factors, therefore, their accounting in the formation of the enterprise's profit is quite simple, but at the same time, it takes into account many technical and technological factors; 4) lubricants and operating materials. The value of this item depends on the price of these materials and their market value, therefore, this item characterizes the set of technical and technological factors that affect the formation of profit, but at the same time is quite simply determined by existing methods [12]. 5) wear and tear and repair of automobile tires. This cost item takes into account the costs of a motor transport enterprise, firstly, for the purchase of new tires to replace worn-out ones and secondly, the costs of restoring the performance of tires during their operation. Tire costs are determined by:

$$C_t = N_t \cdot P_t + \frac{R_{wt}}{100} \cdot k_t \cdot P_t \cdot n_t \cdot \frac{L_g}{1000}, \text{ UAH}, \quad (3)$$

where: N_t – annual tire wear, units;

P_t – price of one set of tires (tyre, tube, rim tape), UAH;

R_{wt} – tire wear and repair rate in % to the cost of the set per 1000 km of mileage %;

k_t – tire mileage adjustment factor, which takes into account the operating conditions of the rolling stock and tire mileage;

n_t – number of tires on cars, units;

L_g – car mileage per year, km.

The first term in formula 3 characterizes the cost of tires and their number on the car, that is, it directly characterizes the car fleet, its model and brand, as well as the car owner's preference for installing one or another model of tires on the car. That is, it indirectly characterizes the production capacity of the enterprise and the organization of repair production. The second term characterizes the quality of tires used on cars, the operating conditions of cars, the quality of drivers' work, and the operating modes of cars. Thus, this parameter takes into account a large set of factors that affect the profit of the enterprise and the efficiency of operating trucks;

6) maintenance and repair of vehicles. The calculation of costs for maintenance and repair of trucks is carried out through the cost norms established in UAH per 1000 km of mileage. These norms were developed for domestic models of cars [13]. Currently, these norms can be used taking into account indexation in accordance with the market value of spare parts and materials and the reliability of cars in the conditions of operation of transport enterprises. It is more difficult to determine the costs for new models of imported trucks, for which similar norms have not been established. In this case, the enterprise must organize work on the accumulation and processing of statistical information on the actual cost of spare parts and their market value;

7) general expenses. This item of the cost of vehicle operation is taken equal to 25% of the total costs of the previous items of the cost of vehicle operation, and therefore indirectly takes into account the entire set of factors that affect the profit of the enterprise and the efficiency of vehicle operation. The values of the cost items are also quite simply calculated using well-known methods [14]. The structure of the cost of cargo transportation by automobiles [15]:

$$\Sigma S = (S_{LU} + S_{PCT} + S + S_s) \cdot W_Q + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10}, \text{ UAH}, \quad (4)$$

where: W_Q – transportation volume, t;

S_{LU} – costs of loading and unloading operations, UAH/t;

S_{PCT} – costs of preparing cargo for transportation, UAH/t;

S – costs of transporting 1 t of cargo, UAH/t;

S_s – costs of storing cargo, UAH/t;

R_1 – costs associated with increasing the distance of transporting cargo, UAH;

R_2 – costs associated with the mismatch of rolling stock with the type and nature of the cargo, UAH;

R_3 – costs associated with damage and loss of cargo, UAH;

R_4 – costs associated with performing additional loading and unloading operations, UAH;
 R_5 – costs associated with additional storage of cargo, UAH;
 R_6 – costs associated with the inertia of the transport process, UAH;
 R_7 – costs associated with increasing the cost of transportation, UAH;
 R_8 – costs associated with an increase in the cost of loading and unloading operations, UAH;
 R_9 – costs associated with an increase in the cost of preparing cargo for transportation, UAH;
 R_{10} – costs associated with an increase in the cost of storing cargo, UAH.

The costs of transporting cargo have the following structure [14; 15]:

$$S = S_F + S_{IM} + S_{MR} + S_{TWR} + S_D + S_O + S_T, \text{ UAH}, \quad (5)$$

where: S_F – fuel costs, UAH;

S_{LM} – costs for lubricants and other operating materials, UAH;

S_{MR} – costs for maintenance and repair, UAH;

S_{TWR} – costs for tire wear and repair, UAH;

S_D – depreciation costs, UAH;

S_O – overhead costs, UAH;

S_T – costs for taxes, UAH.

These operating costs for freight transportation by car can be divided into conventionally technical (variable) – $S_F, S_{IM}, S_{MR}, S_{TWR}$ and conventionally organizational (conditionally constant) – S_D, S_O, S_T . The last group of components changes when updating the fleet of commercial vehicles approximately the same for any choice, so it can be neglected in further calculations.

In practice, the costs of the cost items: fuel S_F , lubricants and other operating materials S_{LM} and restoration of worn tires and repair S_{TWR} are determined according to existing methods, and sufficiently correspond to the actual production values [16]. Maintenance and repair costs S_{MR} in these methods consist of the costs of labor for repair workers, costs for spare parts and materials. Maintenance and repair costs are calculated based on specific norms for specific models of cars, UAH/1000 km. The existing values of this norm were developed for outdated car models and are currently used taking into account indexation coefficients, there are none for foreign car models and modern domestic ones.

In this expense item, we will include only the costs of spare parts and materials used in the maintenance and repair of vehicles, designating them as S_{SPM} .

The costs of paying repair workers are attributed to the group «conditional and organizational». Then the conditional and technical costs have the form:

$$CTC = S_F + S_{LM} + S_{TWR} + S_{SPM}, \text{ UAH} \quad (6)$$

This indicator of truck usage indirectly takes into account, in monetary terms:

- 1) design features of the vehicle, directly related to the operation of rolling stock on the line;
- 2) actual reliability of the vehicle in specific operating conditions of the motor transport enterprise;
- 3) efficiency of the vehicle for specific operating conditions;
- 4) cost and consumption of spare parts and materials for a specific model of vehicle.

This indicator allows:

- 1) to assess the efficiency of the use of vehicles in monetary terms;
- 2) to compare the efficiency of different brands and models of vehicles in monetary terms;
- 3) to choose the most rational fleet of rolling stock;
- 4) to indirectly assess the efficiency of the operation of the vehicle operation service in various motor transport enterprises in monetary terms.

Having analyzed the conventional and technical costs (CTC) when using vehicles, we obtain:

1) fuel costs [14]:

$$S_F = P_F \cdot Q_{FC} = P_F \cdot 0,01 \cdot (N_L \cdot L + N_{thkm} \cdot W)(1 + 0,01 \cdot k), \text{ UAH} \quad (7)$$

where: P_F – price of 1 liter of fuel, UAH;

Q_{FC} – fuel consumption, l;

N_L – fuel consumption rate of the vehicle, l/100 km;

L – vehicle mileage for the reporting period, km;

N_{thkm} – fuel consumption rate for transport work, l/100 thkm;

W – volume of transport work, thkm;

k – surcharge taking into account operating conditions, %.

$$W = Q_{CW} \cdot L_{CM}, \text{ thkm}, \quad (8)$$

where: Q_{CW} – cargo weight, t;

L_{CM} – cargo mileage, km.

Then:

$$S_F = P_F \cdot Q_{FC} = P_F \cdot 0,01 \cdot (H_L \cdot L + N_{thkm} \cdot Q_{CW} \cdot L_{CM})(1 + 0,01 \cdot k), \text{ UAH} \quad (9)$$

2) lubricant costs [14]:

$$S_{LM} = P_{LM} \cdot Q_{LM} = 0,01 \cdot S_F \cdot Q_F \cdot N_{LM}, \text{ UAH} \quad (10)$$

where: P_{LM} – price of 1 liter (kg) of lubricant;

Q_{LM} – lubricant consumption, l (kg);

N_{LM} – lubricant consumption rate, l(kg)/100 l of fuel.

3) tire costs [14]:

$$S_{TWR} = P_T \cdot N_T + 0,01 \cdot N_T \cdot k_T \cdot n_T \cdot (0,001 \cdot L), \text{ UAH} \quad (11)$$

where: P_T – tire price, UAH;

N_T – tire consumption, units;

N_T – tire wear and repair rate in % of the cost of the set per 1000 km of mileage, %;

k_T – tire mileage adjustment factor, which takes into account the operating conditions of the rolling stock and tire mileage;

n_T – number of tires on cars, units;

L – vehicle mileage for the reporting period, km.

The annual tire consumption is:

$$N_T = \frac{n_T \cdot L}{L_N}, \quad (12)$$

where: L_N – tire mileage, km;

L – vehicle mileage for the reporting period, km.

Therefore:

$$S_{TWR} = P_T \cdot \frac{n_T}{L_N} + 0,001 \cdot N_T \cdot k_T \cdot n_T \cdot (0,001 \cdot L), \text{ UAH} \quad (13)$$

4) costs of spare parts and materials used in maintenance and repair [14]:

$$S_{SPM} = L \cdot P_{SPM}, \text{ UAH}, \quad (14)$$

where: L – vehicle mileage for the reporting period, km.

P_{SPM} – specific costs for spare parts and materials, UAH/km.

To determine the value of conventional and technical costs, formulas 9, 10, 13 are used. Multiplying the obtained formulas by the cost of these materials C_i , UAH/unit. of material, we will obtain their absolute values. To bring them into a comparable form, when comparing cars by this indicator, it is necessary to divide it by the volume of freight transport work performed for the reporting period W , thkm. Then formula (6) for specific conventional and technical costs for the operation of a car when delivering goods can be written as:

$$STC = \frac{1}{W} \cdot [(P_F \cdot 0,01 \cdot (N_L \cdot L + N_{thkm} \cdot Q_C \cdot L_{EC}) \cdot (1 + 0,01 \cdot k) + P_{LM} \cdot 0,01 \cdot Q_F \cdot N_L + P_T \cdot \frac{n_T \cdot L}{L_N} + 0,001 \cdot N_T + k_T \cdot n_T \cdot L + L \cdot P_{SPM})], \text{ UAH/thkm} \quad (15)$$

where: W – volume of freight transport work performed during the reporting period, thkm;

P_F – price of 1 liter of fuel, UAH;

N_L – basic fuel consumption rate, l/100km;

L – vehicle mileage for the reporting period, km;

N_{thkm} – fuel consumption for transport work, l/100 thkm;

Q_C – weight of the cargo being transported, t;

L_{EC} – distance with cargo, km;

k – allowance taking into account operating conditions, %;

P_{LM} – price of 1 l (kg) of lubricants, UAH

N_{LM} – lubricant consumption rate, l (kg)/100 l of fuel;

P_T – tire price, UAH;

n_T – number of tires on cars, units;

L_N – standard tire mileage, km;

N_T – tire wear and repair rate in % of the cost of the set per 1000 km of mileage, %;

k_T – tire mileage adjustment factor, which takes into account the operating conditions of the rolling stock and tire mileage;

P_{SPM} – specific costs for spare parts and materials, UAH/km.

Let us simplify formula 15 by denoting:

$A_{dd} = (1 + 0,01 \cdot k)$ – fuel consumption allowance depending on operating conditions;

$P_F^{WCA} = N_L \cdot L$ – fuel consumption of cars without load;

$C_T^W = N_{thkm} \cdot Q_C \cdot L_{EC}$ – fuel consumption for transport work;

$W_T = \frac{n_T \cdot L}{L_N}$ – wear (consumption) of car tires;

$C_T^C = 0,01 \cdot N_T \cdot k_T \cdot n_T \cdot (0,001 \cdot L)$ – tire retreading costs.

Then we get the formula:

$$STC = \frac{1}{W} \cdot [P_F \cdot 0,01 \cdot (P_F^{WCA} + C_T^W) \cdot A_{dd} + P_{LM} \cdot 0,01 \cdot (P_F^{WCA} + C_T^W) \cdot N_{LM} + P_T \cdot W_T + C_T^C + L \cdot P_{SPM}], \text{ UAH/thkm} \quad (16)$$

When assessing options for updating the rolling stock fleet, it is recommended to use the value of the economic effect as the main criterion, which is defined as the difference of proportional reduced annual costs:

$$E_Y = (S_1 + E_R \cdot K_1) - (S_2 + E_R \cdot K_2) = S_1 - S_2 \pm E_R \cdot \Delta K, \text{ UAH}, \quad (17)$$

where: S_1, S_2 – current annual production costs for the 1st and 2nd options, UAH;

K_1, K_2 – capital investments by options, UAH;

ΔK – difference in capital investments, UAH;

E_R – coefficient of reduction of capital investments by options to current annual production costs.

Then the effect achieved by the owner of the commercial truck fleet, UAH, when updating it can be expressed as:

$$E_V^O = (CTC_1 + E_R \cdot K_1) - (CTC_2 + E_R \cdot K_2) = CTC_1 - CTC_2 \pm E_R \cdot \Delta K, \text{ UAH}, \quad (18)$$

where: CTC_1, CTC_2 – conventionally technical components of operating costs for cargo transportation according to the 1st (base) and 2nd (new) options.

The value of the E_R coefficient in our time should be understood as the spread of the cost of capital investments by the years of their implementation. Therefore, the value of this coefficient will be determined directly at the production site, individually for each car. Provided that the cars selected for operation are in the same price category and will be operated for the same number of years, the coefficient in our case can be neglected. Then the annual effect of the rolling stock owner E_V^O , which is achieved when putting into operation car models with lower CTC (provided that all other components affecting the company's profit are equal):

$$E_V^O = \Delta CTC = CTC_1 - CTC_2, \text{ UAH} \quad (19)$$

The specific effect E_V^O (UAH/thkm) is equal to [14]:

$$E_V = \Delta GCTC = \frac{1}{W} \cdot (CTC_1 - CTC_2), \text{ UAH/thkm}, \quad (20)$$

where: W – volume of transport work carried out by cars, thkm.

Fuel cost difference:

$$\begin{aligned} \Delta S_F &= P_{F1} \cdot 0,01 \cdot (P_{F1}^{WCA} + C_{T1}^W) \cdot A_{dd1} - P_{F2} \cdot 0,01 \cdot (P_{F2}^{WCA} + C_{T2}^W) \cdot A_{dd2} = \\ &= 0,01 \cdot P_{F1} \cdot P_{F1}^{WCA} \cdot A_{dd1} + 0,01 \cdot P_{F1} \cdot C_{T1}^W \cdot A_{dd1} - 0,01 \cdot P_{F2} \cdot P_{F2}^{WCA} \cdot A_{dd2} - 0,01 \cdot P_{F2} \cdot C_{T2}^W \cdot A_{dd2}, \text{ UAH} \end{aligned} \quad (21)$$

Let us denote: $Q_{S1}^{FA} = P_{F1}^{WCA} \cdot A_{dd1}$; $Q_{S1}^C = C_{T1}^W \cdot A_{dd1}$; $Q_{S2}^{FA} = P_{F2}^{WCA} \cdot A_{dd2}$; $Q_{S2}^C = C_{T2}^W \cdot A_{dd2}$.

Then we get:

$$\Delta S_F = 0,01 \cdot P_{F1} \cdot (Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C) - 0,01 \cdot P_{F2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \quad (22)$$

Let us introduce the relative comparison coefficient [14; 15]:

$$K_i = \frac{S_i^n}{S_i^b}, \quad (23)$$

where: S_i^n , S_i^b – value of the i -th cost item in the new and basic variants, respectively.

In accordance: $K_{PF} = \frac{P_{F1}}{P_{F2}}$ – evaluation criterion based on fuel cost. Then we get: $P_{F1} = K_{PF} \cdot P_{F2}$;

$$K_{QS} = \frac{Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C}{Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C} \text{ – fuel consumption evaluation criterion. Therefore: } Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C = K_{QS} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C).$$

We get the following formula:

$$\begin{aligned} \Delta S_F &= 0,01 \cdot (K_{PF} \cdot P_{F2} \cdot K_{QS} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) - P_{F2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C)) = \\ &= 0,01 \cdot P_{F2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot (K_{PF} \cdot K_{QS} - 1), \text{ UAH} \end{aligned} \quad (24)$$

Difference in lubricant costs:

$$\begin{aligned} \Delta S_{LM} &= P_{LM1} \cdot (0,001 \cdot (P_{F1}^{WCA} + C_{T1}^W) \cdot A_{dd1}) \cdot N_{LM1} - P_{LM2} \cdot (0,001 \cdot (P_{F2}^{WCA} + C_{T2}^W) \cdot A_{dd2}) \cdot N_{LM2} = \\ &= 0,001 \cdot P_{LM1} \cdot (Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C) \cdot N_{LM1} - 0,001 \cdot P_{LM2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot N_{LM2}, \text{ UAH} \end{aligned} \quad (25)$$

Denote: $K_{PLM} = \frac{P_{LM1}}{P_{LM2}}$ – lubricant evaluation criterion. Then: $P_{LM1} = K_{PLM} \cdot P_{LM2}$; $K_{QS} = \frac{Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C}{Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C}$ –

fuel consumption evaluation criterion. Then: $Q_{S1}^{FA} - Q_{S1}^C = K_{QS} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C)$. Similarly: $K_{NLM} = \frac{N_{LM1}}{N_{LM2}}$ –

evaluation criterion based on the lubricant consumption rate. Then: $N_{LM1} = K_{NLM} \cdot N_{LM2}$.

Therefore:

$$\begin{aligned} \Delta S_{LM} &= 0,001 \cdot (K_{PLM} \cdot P_{LM2} \cdot K_{QS} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot K_{NLM} \cdot N_{LM2} - P_{LM2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot N_{LM2}) = \\ &= 0,001 \cdot P_{LM2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot N_{LM2} \cdot (K_{PLM} \cdot K_{QS} \cdot K_{NLM} - 1), \text{ UAH} \end{aligned} \quad (26)$$

Tire cost difference:

$$\Delta S_{T1} = P_{T1} \cdot W_{T1} - P_{T2} \cdot W_{T2} \quad (27)$$

Let's express: $K_{PT} = \frac{P_{T1}}{P_{T2}}$ – criterion for evaluating the value of car tires. Then: $P_{T1} = K_{PT} \cdot P_{T2}$;

$K_{WT} = \frac{W_{T1}}{W_{T2}}$ – tire wear (consumption) evaluation criterion. Ago: $W_{T1} = K_{WT} \cdot W_{T2}$. In accordance:

$$\Delta S_T = K_{PT} \cdot P_{T2} \cdot K_{WT} \cdot W_{T2} - P_{T2} \cdot W_{T2} \cdot W_{T2} = P_{T2} \cdot W_{T2} \cdot (K_{PT} \cdot K_{WT} - 1), \text{ UAH} \quad (28)$$

Tire retreading cost difference:

$$\Delta S_P^T = P_{P1}^T - P_{P2}^T \quad (29)$$

Let's express: $K_{P_p^T} = \frac{P_{P1}^T}{P_{P2}^T}$ – evaluation criterion based on the cost of retreading automobile tires. Then:

$P_{P1}^T = K_{P_p^T} \cdot P_{P2}^T$. In accordance:

$$\Delta S_P^T = K_{P_p^T} \cdot P_{P2}^T - P_{P2}^T = P_{P2}^T \cdot (K_{P_p^T} - 1), \text{ UAH} \quad (30)$$

The difference in costs for spare parts and materials with the same mileage of the compared cars L (km) [14; 15]:

$$\Delta S_{SPM} = L \cdot (P_{SPM1} - P_{SPM2}), \text{ UAH} \quad (31)$$

By analogy with the previous formulas, we transform, then:

$$\Delta S_{SPM} = L \cdot P_{SPM2} \cdot (K_{SPM1} - 1), \text{ UAH} \quad (32)$$

Transforming formula 20 taking into account formulas 24, 26, 28, 30 and 32, we obtain:

$$\begin{aligned} \Delta GCTC = & \frac{1}{W} \cdot \left[0,01 \cdot P_{F2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot (K_{PF} \cdot K_{Qs} - 1) + \right. \\ & + 0,001 \cdot P_{LM2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot N_{LM2} \cdot (K_{PLM} \cdot K_{Qs} \cdot K_{NLM} - 1) + \\ & \left. + P_{LM2} \cdot P_{T2} \cdot (K_{PT} \cdot K_{WT} - 1) + P_{P2}^T \cdot (K_{W_p^T} - 1) + L \cdot P_{SPM2} \cdot (K_{SPM1} - 1) \right], \text{UAH/thkm} \end{aligned} \quad (33)$$

Let us denote: $P_{F2} = 0,01 \cdot P_{F2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C)$ – fuel costs of the new car variant;
 $P_{LM2} = 0,001 \cdot P_{LM2} \cdot (Q_{S2}^{FA} - Q_{S2}^C) \cdot N_{LM2}$ – costs for lubricants of the new version of the car. Then the specific conventional and technical costs for transporting goods ($GCTC_{li}$) can be written like this: $GCTC_{li} = K_i \cdot GCTC_{2i}$. Substituting this expression into formula (20), we obtain the value of the specific effect when replacing the base car model with a new version:

$$E_{RSO} = GCTC = K_i \cdot GCTC_{2i} - GCTC_{2i} = GCTC_{2i} \cdot (K_i - 1), \text{UAH/thkm}, \quad (34)$$

where: $GCTC_{2i}$ – specific conventional and technical costs for operating a new vehicle variant in the rolling stock fleet, UAH/thkm.

Expanding this formula taking into account the accepted notations, we will obtain the value of the annual economic effect achieved by the owner of commercial trucks when updating the fleet:

$$\begin{aligned} E_{RSO} = \Delta GCTC = & \frac{1}{W} \cdot \sum_{i=1}^n \left[P_{F2} \cdot (K_{PF} \cdot K_{Qs} - 1) + P_{LM2} \cdot (K_{PLM} \cdot K_{NLM} - 1) + \right. \\ & \left. + P_{WT2} \cdot (K_{PT} \cdot K_{WT} - 1) + P_{PT2} \cdot (K_{W_p^T} - 1) + P_{SPM2} \cdot (K_{SPM} - 1) \right], \text{UAH/thkm} \end{aligned} \quad (35)$$

where: P_{F2} – fuel costs, UAH;

P_{LM2} – costs for lubricants and other operating materials, UAH;

P_{WT2} – costs for tires, UAH;

P_{PT2} – costs for tire repair and restoration, UAH;

P_{SPM2} – costs for spare parts and materials, UAH;

relative coefficients of comparison of options, respectively:

K_{PF} – by fuel cost;

K_{Qs} – by lubricant cost;

K_{PLM} – by lubricant consumption;

K_{PT} – by tire consumption;

K_{WT} – for tire restoration and repair costs;

$K_{W_p^T}$ – by the cost of a set of tires;

K_{SPM} – by spare parts and materials costs.

When determining the economic effect of E_{RSO} for a fleet of vehicles, it is necessary to sum up all vehicles.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

Therefore, the above formulas make it possible to determine the following components of the cost of road transportation, such as costs for: 1) fuel, lubricants and other operating materials; 2) wear and tear and restoration of car tires; 3) costs for maintenance and repair of cars.

In the general structure of the cost of cargo transportation (formula 2.4), it is possible to distinguish two groups of costs: 1) which depend on the volume of cargo; 2) which are associated with the characteristics of cargo and organizational work on cargo processing.

One of the ways to reduce the current costs of operating cars is to update the fleet of motor vehicles, the main criterion for the feasibility of updating is the value of the economic effect, which is defined as the difference between proportional reduced annual costs (formula 2.35).

CONCLUSIONS

The structure of operating costs of cars includes in particular the costs of maintenance and current repairs, the amount of which depends on the level of prices for car services and spare parts. It is also necessary to take into account that the units of modern cars have a high operational resource, but in the event of their malfunctions the price of repairs will be quite high.

Motor transport enterprises that carry out cargo transportation are constantly faced with the issue of increasing profits from their activities, which is impossible without increasing the efficiency of use, reducing the current costs of operating the vehicle fleet. One of the directions is to reduce the cost of transportation.

The implementation of this direction begins with an assessment of the operating costs of specific brands of cars and the selection of the most suitable cars to ensure the transportation process.

LITERATURE

1. Adamovska, V.S. Features of the methodology for calculating the efficiency of using new equipment compared to the baseline. *Efektivna ekonomika*. 2011. №5. Source of electronic access: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=540>
2. Krashenin, O.S.; Shapatina O. O. Determination of transport efficiency by different vehicles. *Information and control systems at railway transport*. 2021. №2. P. 3–8.
3. Bosniak, M. G. Freight road transportation. Kyiv. Publishing House «Slovo». 2010. 408 p.
4. Kashkanov, V. A.; Kashkanov, A. A.; Varchuk, V. V. Organization of road transportation. Vinnytsia. VNTU. 2017. 139 p.
5. Klymenko, I. S.; Kryvosheieva, s. V.; Kryvenko, O. K. Problems and prospects for the development of the passenger road transportation market in Ukraine. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University Series: Economy and Management*. 2019. Vol. 30(69). №6. P. 21–26.
6. Krystopchuk, M. E.; Lobashov O. O. Suburban passenger transportation. Kharkiv. NTMT. 2012. 224 p.
7. Thoruk, E. I.; Kucher O. O.; Doroshchuk V. O. Freight transportation. Rivne. NUWEE. 2015. 132 p.
8. Solarev, O. O.; Tatsenko, O. V.; Voloshko T. P. Criteria for selecting vehicles for transporting goods. *Municipal economy of cities*. 2022. Vol. 6, Issue 173. P. 189–194.
9. Kanarchuk, V. E.; Levkovets P. R.; Melnychenko O. I. Methods, models and algorithms for managing cargo transportation processes in the transport complex. Kyiv. NTU. 2001. 145 p.
10. Maslova, T. V. Efficiency of cargo transportation by road in international traffic for one-time orders. Author's abstract. Kharkiv. 2020. 20 p.
11. Remekh, I. O. Increasing the efficiency of cargo transportation by road in international traffic. PhD. Diss. Kyiv. 2023. 196 p.
12. Methodological recommendations for the rationing of fuel, electricity, lubricants, and other operating materials by vehicles and equipment. Revision 1 dated 11/17/2023. Kyiv. SE «DerzhavotransNDIproject». 2023. 51 p.
13. 200 84001-3-88 Cost norms for maintenance and current repairs of cars and buses. Source of electronic access: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=61251
14. Dmytriiev, I. A; Ivanilov, I. S.; Shevchenko, I. YU.; Kyrchata, I. M. Economics of road transport enterprises. Kharkiv. Brovin O.V. 2018. 308 p.
15. Lutsenko, I. V. Enterprise economics: theory and practice. Lozova. 2017. 128 p.
16. Car tire mileage standards. Order of the Ministry of Transport of Ukraine. December 8, 1997 No. 420. Database «Legislation of Ukraine». Source of electronic access: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0420361-97#Text>

Хаврук В. О. Оцінка ефективності експлуатації вантажних автомобілів

У статті розглядається питання ефективності вантажних автомобілів на основі собівартості вантажних автомобільних перевезень. Детально аналізуються дві групи складових витрат: 1) які безпосередньо залежать від технічних характеристик вантажних автомобілів (витрати на паливо, мастила та інші експлуатаційні матеріали, витрати на знос та відновлення автомобільних шин; витрати на технічне обслуговування та ремонт); 2) які визначаються організаційними особливостями функціонування автотранспортного підприємства (заробітна плата водіїв, відрахування на соціальні потреби, амортизація автомобільного рухомого складу та загальногосподарські витрати).

Загальна структура собівартості вантажних перевезень автомобілями представлена як сума показників, що складають дві групи витрат: 1) які залежать від обсягів вантажів; 2) які пов'язані з характеристиками вантажів та організаційною роботою з обробки вантажів. Детально розглянуті і наведені формули для визначення першої групи витрат (умовно-технічні витрати), оскільки за величиною цих витрат можливо: оцінювати ефективність використання автомобілів в грошовому еквіваленті; порівнювати ефективність різних марок і моделей автомобілів в грошовому еквіваленті; вибрати найбільш раціональний парк автомобільного рухомого складу; оцінювати ефективність роботи служби експлуатації автомобілів в різних автотранспортних підприємствах в грошовому еквіваленті.

Для оцінки доцільності оновлення парку автотранспортних засобів пропонується використовувати величину економічного ефекту, який визначається як різниця пропорційно приведених річних витрат.

Метою статті є надання методичних рекомендацій автотранспортним підприємствам щодо визначення складових транспортних витрат та оцінки доцільності оновлення автомобільного рухомого складу.

Ключові слова: вартість; витрати; ефективність; прибуток; надійність; вантажний автомобіль; собівартість

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: 14.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1906

Anastasia Kochina
Kharkiv National Automobile and Highway University

RESEARCH ON THE DEMAND FOR ROAD PUBLIC TRANSPORTATION IN SUBURBAN TRAFFIC

The analysis of existing approaches to estimating transportation demand based on OD matrix modeling has been conducted to identify the most effective methods for suburban and interurban traffic planning. The interval concept is applied by analyzing patterns of trip length distribution within the city and adjacent territories, allowing the definition of intervals within which transportation demand varies in relation to urban centers. This provides a flexible and probabilistic framework for capturing the variability in passenger flows, taking into account daily and seasonal fluctuations as well as differences in travel behavior between urban and suburban areas. To determine the spatial distribution of trips, actual travel distances around the regional center were analyzed, ensuring that the model reflects real-world travel patterns and regional transport infrastructure.

The proposed methodology was applied to evaluate suburban transportation services, demonstrating its capability to generate OD matrices that are consistent with observed demand and operational data. The results confirm that the interval-based approach can enhance planning accuracy, optimize route allocation, and support decision-making in suburban public transport management. Furthermore, this method contributes to the development of more robust models for forecasting transportation demand, offering practical guidance for transport planners and policymakers aiming to improve service efficiency and passenger satisfaction. The study highlights the potential of integrating probabilistic modeling techniques into transportation planning to account for uncertainties and dynamic changes in travel behavior, providing a scientific basis for evidence-based decision-making in the organization of suburban transport systems.

Keywords: demand, suburbanarea, city, commuters, distance, OD matrix.

INTRODUCTION

Under present-day conditions, there is an increasing tendency for some of the inner-city residents to prefer to live outside the city, in the so-called suburbs, that is, in the residential areas that surround the major city. The suburban area is formed under the impact of “suburbanization” that is the process of growth and development of the suburban area of major cities [1], resulting in the formation of urban agglomerations, which are interdependent groups of settlements (primarily urban) united into dynamic systems by different types of ties (labour, production, recreational, infrastructure, etc.). This causes faster development of the suburbs (primarily demographic) compared to the central city [2]. The suburbs are starting to develop at the expense of the central city: a rapid shift of urban residents from the central city areas into the suburbs occurs as well as the relocation of industrial, social and other functional facilities. In turn, the suburban inhabitants are more likely to seek employment and appropriate education in the central city by commuting from home to work or study [3]. That is, there is a continuous interaction between the city and its surroundings, which is realized through their interconnections. One of the important factors of this interaction is population displacement, which involves both centripetal and centrifugal trips.

The suburbanization process is a further stage in the development of the urbanization process, and the development of the transportation system is a prerequisite for both these processes. Special attention should be given to the efficient management of the passenger transportation system, which requires accurate determining the transportation needs of the population. The regularities and conditions for organizing transportation result from fulfilling transportation needs, which are met within the specific transportation supply, the so-called transportation accessibility [4]. The trip number of suburban inhabitants is one of the main characteristics of the transportation process, which depends on the ways of fulfilling the transportation demand and is influenced by the importance of the city in the system of international, state, regional socio-economic, historical-cultural and other spheres, as well as the nature and content of the system of population distribution and places of work in the sphere of influence of the city including its surroundings. The distribution of the transportation demand in the area surrounding the city determines the regularities of trip length distribution all around the city [4] and can serve as a demand-modelling basis for public transportation services in suburban traffic. Describing the demand pattern of road public transportation is one of the most important tasks of modelling the transportation system of the city with adjacent territories, which is virtually researched in contrast to the methods and approaches within the cities. It lies in determining the most accurate OD matrix, which provides an opportunity to become aware of the quality of public transportation services and to test scenarios of the agglomeration expand.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

There are two main approaches to determining the needs for transportation, which are the basis for the OD matrix (ODM) formation. The first one involves surveys aimed at obtaining information on the current rate of demand fulfilment and obtaining information on the regularities and peculiarities of demand formation for mass transit [5]. Conducting field surveys provides information on actual passenger traffic, fill rate of transportation means and the trips' number. Questionnaires and statistical reports provide the idea of population mobility (travel regularities of different population groups, depending on the purpose of the trip), settlement patterns concerning places of work, attendance of cultural-domestic institutions, changing places of work and moving house (changes in settlement patterns) and trip time (possible regularities of passenger travel behaviour). Conducting a full-fledged survey provides enough accurate information, but it is time and labour consuming. Existing transportation reports do not always provide full information on the distribution of trips depending on the purpose of movement.

The second approach that is based on using different demand forecasting models determines the dynamics, trends, and patterns of demand development. This approach is less labour-intensive but does not always provide sufficiently accurate results and in some cases, it simplifies real processes. Using models to calculate the ODM comes with the application of the methods based on the statistical analysis of data on actual trip directions, as well as the methods based on a priori logic hypotheses [6, 7]. Three main approaches to the formation of the ODM can be distinguished, namely statistical, synthetic and probabilistic approaches.

The statistical approach requires field surveys of trips [7] and allows obtaining the most accurate information on the transportation needs of the population. Such total surveys are mostly conducted using a questionnaire and contribute to the formation of the most accurate ODM. This approach also implies the application of statistical methods for calculating the ODM, which allows applying available trips' number values of the current or previously investigated period for the future analysis period. Such methods include the growth factor method, the Detroit method, the Furness method (the Fratar method) and others [5, 7]. However, conducting surveys to obtain the actual matrix is cost-intensive and modelling is performed only for the rates of growth or decay (decline) of trips' number.

A group of methods, which can be distinguished under the latter approach to obtain the ODM, use various synthetic models based on the similarity assumed to exist between processes occurring within the transportation system and physical processes as well as laws of nature [7, 8]. This approach is considerably less labour intensive to form the ODM, but it does not provide sufficiently accurate results. To calculate the trips' number, gravity and entropy models, as well as the intervening opportunities method, are used.

Methods taking into account, to some extent, the credibility of the approach to modelling ODM [8] is based on the assumption that each individual selects a traffic route from a finite number of alternatives considering their socio-economic characteristics and relative attractiveness using discrete choice models, for instance. Multiple correlation models [5, 7] based on identifying factors that specify the emergence of transportation needs and their impact on the formation of passenger flows through the determination of coefficients in the correlation equation that determines the passenger trips' number.

Almost all the methods of obtaining the ODM are characterized by using the unique algorithm for calculating and the point estimate of the matrix. The approach to determining the population demand for public transportation services that provides an opportunity of obtaining the most probable states of the ODM, which are as close to the actual demand state of public transportation service as possible, is presented within the framework of interval concept [7]. This concept assumes that demands for home-based work trips are random and can be described not by a single ODM, but by a set of them. Each matrix from the set represents one of the possible states of the transportation demand. Their fluctuations are within the range corresponding to demand states with the minimum and maximum transportation operation that is performed during the course of the passenger movement process. One of the reasons for such representation of suburban transportation needs is the shift in demand depending on the scope of influence of the city on the magnitude of movements for the specific transportation mode.

A significant impact of human settlements on the intensity of traffic flow on public roads is specified in the work [8]. The models reflecting an increase in traffic intensity on approaching a high-way section located near human settlements have been obtained on the basis of the regression analysis. However, the application of the model gives the possibility of predicting only the magnitude of traffic intensity within the suburban area and does not allow taking into account the probabilistic nature of the shift in demands for transportation depending on the distance of human settlements from the major city.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

Considering the existing problems of determining suburban transportation needs and approaches to the ODM calculation, the relevant objective is to develop the model of suburban transportation needs. The model should be developed using the approach, in which it is reasonable to apply the interval concept to calculate suburban ODM. The application of the interval concept must be based on the patterns of trip distribution within the area surrounding the city. The regularities of the spatial distribution of trips can be determined based on actual distances within the area surrounding the city [4].

RESEARCH RESULTS

According to the work [4], in considering the trip length outside major city l'_p as a random variable of the trip length in the suburban traffic, it has been found that its distribution must be exponential with the shift parameter, on condition that it is a part of the trip length distribution, which is considered both within the city and beyond the city borders. Determining the regularities of the distribution of l'_p creates the basis for identifying the needs for suburban public transportation, which reflects the distribution of distances of all suburban passenger trips. As previously defined, the form of a demand model between the origin and destination points of transportation traffic is the OD matrix. Taking into account that the values in ODM cells represent the frequency of trips over a certain distance and using the concepts of the statistical probability of an event and exhaustive events, the probability of occurrence of a certain trips' number can be written as follows:

$$p(h_{ij}) = \frac{h_{ij}}{H}, \quad H = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m h_{ij}, \quad (1)$$

where h_{ij} is a trips' number from zone i to zone j , during time interval considered, pass.;

H is the sum of all trips in the matrix, pass.

The empirical probability of moving h_{ij} over a certain distance $l'_{p_{ij}}$ is determined as follows

$$P_{em}^{(h_{ij})} \{l'_{p_{ij}} \in \Delta\} = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m \frac{h_{ij}}{H} I_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta\}}, \quad (2)$$

where $I_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta\}}$ is the indicator of event, which implies that the travel distance $l'_{p_{ij}}$ from zone i to zone j is within some interval Δ .

That is, equation (2) is a probabilistic combination of event indicators $I_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta\}}$. Considering the actual distribution $l'_{p_{ij}}$, which according to [4] has five groups of intervals, if there is a probability of moving over a certain distance, which belongs to the interval Δ and the matrix of distances between transportation zones, according to the interval concept of determining transportation needs it is possible to determine the ODM states that provide support for the exponential distribution of $l'_{p_{ij}}$. This allows taking into account the probabilistic nature of transportation links and eliminating the disadvantages of point estimate of the ODM. The formation of the most probable states of the ODM within the framework of the interval concept based on the actual information on the trips' length $l'_{p_{ij}}$ that the population commits provide an opportunity of determining the percentage ratio of the number of inhabitants, whose travel distances to the city correspond to the defined intervals of trip length. The proportion of inhabitants, whose travel distance $l'_{p_{ij}}$ lies within a certain interval can be determined as the difference of values of the function of exponential distribution at points corresponding to the boundaries of the given interval:

$$P_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta_I\}} = P_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta_I\}} = P_{\{l'_{p_{ij}} \in (\Delta_I^u; \Delta_I^e)\}} = Z(\Delta_I^e) - Z(\Delta_I^u), \quad (3)$$

where $P_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta_I\}} = P_{\{l'_{p_{ij}} \in \Delta_I\}}$ is the probability that the travel distance $l'_{p_{ij}}$ is within the interval Δ_I ;

$\Delta_I = (\Delta_I^u; \Delta_I^e)$ is the group interval of travel distances of passengers that is defined by the lower Δ_I^u and upper Δ_I^e limits, $I = 1, 2, \dots, x_{Im}, x_{Im}$ is the number of group intervals of travel distances of passengers;

$Z(\Delta_I^e), Z(\Delta_I^a)$ is the value of distribution function $l_{p_{ij}}$ at points Δ_I^e and Δ_I^a respectively, accordingly the total number of movements $H^{(\Delta_I)}$ that must be made at a distance from a certain interval Δ_I can be defined as follows

$$H^{(\Delta_I)} = P\{l_{ij}^{(\Delta_I)}\} \cdot H, \quad (4)$$

where H is the total trips' number during time interval considered, pass.

To obtain the ODM, it is necessary to find a distribution of trips' number that corresponds to the system of limitations

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m h_{ij} = HO_i, \sum_{j=1}^m h_{ij} = HP_j; \\ \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} h_{ij}^{(\Delta_I)} = H^{(\Delta_I)}, i \neq j, I = 1, 2, \dots, x_{int}; \\ \sum_{I=1}^{x_{int}} H^{(\Delta_I)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} = H, \end{cases} \quad (5)$$

where h_{ij} is the required trips' number between transportation zones i and j , pass., $h_{ij} \geq 0$;

m is the number of departure and arrival zones, units; HO_j, HP_i is the arrival and departure capacity of each transportation zones, pass.; $h_{ij}^{(\Delta_I)}$ is the trips' number, which are realized at a distance $l_{ij}^{(\Delta_I)}$.

To obtain the OD matrix, which satisfy the limitations (5), the algorithm for calculating suburban transportation needs has been developed. In order to implement the developed methodology for determining the suburban transportation needs in public transportation sector, the following data are required: the arrival and departure capacity of the transportation zones; the matrix of the shortest distances between transportation zones; the probability of movements according to the exponential distribution of the trips' length at points corresponding to the boundaries of the given interval.

The first stage involves checking the balance between the departure and arrival capacity of the transportation zones $\sum_{i=1}^m HO_i = \sum_{j=1}^m HP_j = H; i, \dots, m; j, \dots, m$ and the actual distribution of movements according to the value of the exponential distribution function within the specified intervals of the total number of movements between the transportation zones $\sum_{I=1}^{x_{int}} H^{(\Delta_I)} = H$

The next step is filling out the OD matrix using a random number generator with a gradual check of each random value in the matrix and the forming of a random state in the ODM is performed.

According to the random ODM and the matrix of the shortest distances, the frequency at which travel distances $h_{ij}^{(\Delta_I)}$ fall within the given interval Δ_I is calculated. After that, the compliance with the actual hit frequencies $l'_{p_{ij}}$ is evaluated and corrected using closed loops. The calculation is carried out until the calculation of the value h_{ij} in the ODM corresponds to the actual distribution $l'_{p_{ij}}$.

The practical implementation of the developed methodology has been carried out by the example of public transport network model of the Kharkiv region. The departure capacity of the transportation zones has been defined as the potential number of inhabitants of human settlements situated in the area surrounding the major city, who move in the direction of the city in accordance with the characteristics of human settlements and the predicted value of traffic intensity of public transit. Last value is determined according to the experimental studies [9] considering other types of public transport links.

$$HO_i = N_{.m_i} \cdot \frac{1}{0,829 + \frac{12,59}{L_i} + 0,023 \cdot P^{0,367}} \cdot k_{z_i}, \quad (6)$$

where $N_{.m_i}$ is the number of inhabitants of human settlement i , who commutes in the direction of the

city, people.; L_i is the remoteness of human settlement i , from the city, km; k_{3_i} is the proportion of trips made using public railway system of human settlement i , %; P is the number of inhabitants of the city, in the direction towards which the travel takes place, people.

Experimental verification of the proposed methodology for determining the departure capacity of the transportation zones for human settlements has been carried out based on a sampling survey using the tabular method of passenger flow surveys for different categories of routes in various principal traffic directions. The maximum deviation of the calculated data according to the experimental studies is 0.31. The arrival capacity of the transportation zone has been determined to take into account the total number of inhabitants of human settlements who move in the direction of the city and the presence of bus stations and transit trips which ends in the city. The public transport network model and the matrix of the shortest distances between transportation zones have been calculated using the VISUM software.

The point objects that define the spatial position of the intersections – “nodes”, which are also the starting points or respectively endpoints of the segments are placed on the loaded “background”. For more accurate refining of “nodes” real coordinates of their location are assigned. The next step of modeling is the allocation of “segments” that are directed edges, which characterize the forward and reverse directions and are independent objects of the network. The segments connect the nodes and thus describe the structure of the road network. After that, the objects that describe the state of attractors in the network, namely zones are entered into the supply model. The points of attraction of passengers, which are human settlements, are assigned as zones. The zones in the transport model are entry points and the purpose of the transport movement. The centre of the transportation zone is defined in specific human settlements according to the main directions of passenger traffic with approximately the same area of service. They are connected to the network by a “junction”. The junctions connect the “zones” with the road network. For each specific transportation system, they correspond to the ending and starting pedestrian crossways between the zone centre and the junction. The next step of the design process is to plot the stopping points on the map of the object under consideration and register regular suburban and regional traffic routes.

Table 1 General description of the model

Parameter		Value
Number of stopping points, units		689
Number of transportation zones, units		199
Number of human settlements in the region, units		218
Number of inhabitants of human settlements, people.	minimum	16
	maximum	56 655
The total population, thousand people		878.485
The area of a human settlement, km ²	minimum	0.06
	maximum	56.026
Number of human settlements with railroad transportation service, units		36
Population density, people per sq. km	minimum	5.3
	maximum	3694

The application of the developed algorithm has allowed for the formation of the ODM that corresponds to (3) and (4) and satisfies the limitations (5). In compliance with the actual distribution of travel distances within the Kharkiv region, the fluctuations have been calculated within the given group intervals.

According to the calculations, the maximum fluctuation $\sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} h_{ij}^{(\Delta_i)}$ in compliance with the proposed

methodology of ODM calculation is 8.5 %.

It should be pointed out that the maximum distinguishes is observed at a distance of more than 60 km. This can be explained by the fact that the influence of the city tends to decrease significantly with the distance of human settlements (points of attraction) from the city and restricts suburban transportation service.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The use of the proposed methodology in suburban traffic has advantages compared to previously proposed ones. For example, the study of the spatial distribution of displacements in suburban traffic in [4] is

based on the process of rural population dispersal relative to the regional center. But in the study of settlement patterns, settlements are united depending on the remoteness of their regional center. The procedure for calculating the ODM is based on the gravity model and does not take into account the random nature of the trip directions formation.

Table 2 Estimation of ODM calculation

Group interval	Lower limit, km.	Upper limit, km.	Probability of movement	Number of movements, units			
				according to probability	to according to model	distinguishes	%
1	0	20	0.309	41374	41958	-584	1.4
2	20	40	0.199	26645	27531	-886	3.3
3	40	60	0.153	20486	20324	162	0.8
4	60	80	0.099	13256	14386	1130	8.5
5	80	100	0.240	32135	29697	2438	7.6
TOTAL			1	133896	133896	5200	-

The use of a probabilistic approach in the framework of the interval concept is presented in [7] for the urban territories with a different population based on the distribution function. In this case, the author considers the process of the emergence of new attractors at the city border and the suburban zone. Using this approach served as the basis for the study of the trip length distribution. Confirmation of patterns in the distribution of trip length was presented in [4] in the suburban traffic. Therefore, the proposed methodology was the next step in the study of a suburban land-use.

ODM is certainly an integral part of the public transport model of the suburban transport system for road transport. Without ODM, it is practically impossible to assess the effectiveness of the route network for any kind of trip, both from the passengers' and the carriers' point of view. That is why obtaining the most likely states of the ODM that best reflect the mobility needs of the commuter population is the goal of transport planning and modeling experts. To assess the probabilistic nature of the demand is still a task that requires new solutions and the use of new approaches. The innovation of the developed methodology for determining demand in suburban traffic primarily lies in the possibility of its use in assessing changes in the transport system of the city and its surroundings. When forming the initial information for calculating ODM, separate the most common relationships between the city and the suburban area, determine the real border of the suburban area for towns of regional and district significance.

The results of the calculations by the proposed methodology can represent a methodological basis that can provide a solution to the problems of improving the organization of passenger transportation in suburban traffic both for transport enterprises and for organizations that participate in the management of various types of activities related to the public transport system. For the above-mentioned stakeholders in the transport process, work efficiency can be considered both from a social point of view (meeting demand) and from the economic side - increasing the level of profit and profitability of enterprises.

Risks associated with the inaccuracy in determining the demand in suburban traffic according to the developed algorithm can primarily be associated with the lack of actual data on the distribution of distance of movement across territories in the suburban traffic, in the wrong methodology for conducting a passenger flow survey, in inaccurate information provided by transport enterprises (trips without issued tickets). The elimination of these risks depends on administrative organizations interested in obtaining accurate and reliable information to assess the satisfaction of demand and improve the efficiency of the functioning of the public transport system in suburban traffic.

Uncertainty of the results of calculations may pose increased risks for the population as a result of not being in a timely manner at the final destination, which may include both the place of work and any institution in which there are strict restrictions on the time of arrival. The developed algorithm for determining the OD matrix allows reducing risks for the population due to the inefficient operation of public transport in suburban traffic.

CONCLUSIONS

The proposed methodology of calculating the ODM allows us to take fully into account the probabilistic nature of the demand and to obtain such distribution between the cells of the ODM, which ensures the formation of the actual distribution of travel distance in suburban traffic. Besides, the developed methodology is fully consistent with the interval concept of modeling transportation needs and contributes to its application in suburban transportation service. At that, it is also possible to develop ODM alternatives that

may correspond to the minimum deviation from the actual distribution of movements around the city. The obtained OD matrices can make possible the interval estimation of any parameters related to the realization of transportation needs and, accordingly, the quality of public transportation services.

The application of the developed methodology within the framework of interval concept can significantly reduce a range of possible states of passenger correspondencematrix and allows defining the so-called boundaries of the zones of influence of the city in suburban traffic.

REFERENCES

1. Semenov, V.T. and Shtompel, E. N. (2009), Formirovaniye ustojchevogo razvitiya megapolisov. Urbanisticheskie aspekti [Formation of sustainable development megacities. Urban aspects: monography], Harkov national Academy urban. Activities, Kharkiv, Ukraine. URL: <http://kyiv-heritage.com/sites/default/files/0%D1%84%202014.pdf>.
2. Fomin, I.O. (1997), Osnovi teorii mistobuduvannya [Basic theory of urban planning], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine, 191 pp.
3. Voloshina Yu. Ya. (2015), Theoretical bases of the definition of suburban areas and its key relationship with the city. Electronic journal 'Effective Economy', 10. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/10_2015/45.pdf.
4. Gorbachev P.F., Makarichev O. V., Kochina A.A. (2019), Regularity of distribution of distances of movement of passengers of public transport in suburban communication, KNAME, 5(151), Kharkiv, P. 75-80. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/10_2015/45.pdf.
5. Christophuk M.E. (2017). The impact of transport infrastructure locations on the spatial development of cities. Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Dynamics, strength and design of machines and devices., 866, P. 166-170. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_30.
6. Kochina A.A. (2018) Patterns of spatial characteristics of the route transport in the inland subdivision. KNAME, 139, P. 39-42. URL: <https://khgts.kname.edu.ua/index.php/khgts/article/view/5098>
7. Svichinsky S.V. (2015). Formation of the function of urban population settlement to determine the needs for transportation by public transport. Kharkiv, P. 223.
8. Gorbachev P.F., Makarichev O. V., Kochina. A.A. (2018). The regularities of distribution of distances from the regional center to the stopping points around it. Lutsk National Technical University, 2(11), P. 50-55. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/download/5447/5371/>.
9. Kochina A.A. (2021). Assessment of the impact of settlements on the intensity of traffic flows on public roads. Modern technologies in mechanical engineering and transport. 1(16). P. 74-82. URL: [DOI 10.36910/automash.v1i16.510](https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.510)

A. Кочина. Дослідження попиту на автомобільні перевезення громадським транспортом в приміському сполученні

Було проведено аналіз існуючих підходів до оцінки транспортного попиту на основі моделювання матриці пасажирських кореспонденцій з метою визначення найефективніших методів планування приміського та міжміського руху. Інтервальна концепція застосовується шляхом аналізу моделей розподілу довжини поїздок у межах міста та прилеглих територій, що дозволяє визначити інтервали, в межах яких транспортний попит варіюється у відношенні до міських центрів. Це забезпечує гнучку та імовірнісну основу для відображення пасажиропотоків, а також відмінностей у поведінці пасажирів між міськими та приміськими районами. Для визначення просторового розподілу поїздок було проаналізовано фактичні відстані поїздок навколо регіонального центру, що забезпечило відображення в моделі реальних моделей поїздок та регіональної транспортної інфраструктури.

Запропоновано методику визначення попиту на пересування в приміському сполученні на основі інтервальної концепції розрахунку матриці МПК, яка дозволяє отримати найбільш ймовірнісні стани МПК, котрі максимально наближені до реального стану попиту. Застосування інтервальної концепції ґрунтується на закономірностях розподілу пересування на території, що оточує місто та надає можливість визначити інтервали в межах яких змінюється попит на пересування відносно міста. При визначенні закономірностей просторового розподілу пересувань були використані фактичні відстані пересувань навколо обласного центру та здійснено оцінку запропонованого підходу визначення попиту на пересування в приміському сполученні.

Ключові слова: попит, приміська зона, місто, пасажирів, відстань, матриця пасажирських кореспонденцій

КОЧИНА Анастасія Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних системи і логістики, Харківський національний автомобіль-дорожній університет e-mail: kochina.tsl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8377-4770>

Anastasia. KOCHINA, PhD, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: kochina.tsl@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8377-4770>

Дата надходження статті до видання: 24.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1907

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

FUNCTIONAL ADAPTATION IN A GRAIN CARRIER WHEN THE MASS OF TRANSPORTED GRAIN IS UNSTABLE

The methodology of functional adaptation of a grain truck by adjusting the speed depending on the density of the transported grain crop is proposed. As a result of studying the functional adaptation of a grain truck with an unstable mass of transported grain, it was found that fluctuations in the grain cargo during transportation significantly affect the stability of the vehicle, especially during maneuvering and braking. When estimating the weight of a grain truck, the density of the transported grain must be taken into account. The volumetric carrying capacity of a grain truck is carefully assessed by establishing a functional dependence on such parameters as nominal carrying capacity, volumetric carrying capacity, body volume, and cargo volume. The dynamic space of grain truck operation is based on a metric state space, each element of which fully determines the state of the system under consideration according to certain functional parameters. If one or more functional parameters of the grain truck are unstable and deviate from their nominal values, the grain truck may lose its functional stability and not perform the functions defined by the regulatory and technical documentation. In such cases, the dynamic operating space is characterised by transfer functions that provide a mathematical basis for analysing the behaviour of the system. During the operation of a grain truck, the task of ensuring its functioning in one of two areas is solved: the area of operation or the area of optimal operation. To ensure that the grain carrier operates in the optimal region, it is necessary to select such nominal values of functional parameters and tolerance fields to ensure the position of the spread and outputs in this region.

Keywords: functional adaptation, grain carrier, grain mass, mass instability, acceleration, equation of motion.

INTRODUCTION

Ukraine is rightly considered a grain country due to the efficient transportation of grain from fields to granaries, from elevators to processing plants, and to seaports. Ukraine has created a KrAZ «Karavan-2» grain haulage train consisting of a KrAZ-6511 C4 dump truck and a PCWi-33 dump trailer with technical and economic indicators on par with foreign analogs (Fig. 1) [1].



Fig. 1 – KrAZ-6511C4 grain carrier

The KrAZ-6511C4 grain truck is equipped with a 400-hp Weichai Power WP12. 400E40 (Euro 4) with SCR exhaust gas cleaning system, MFZ 430 clutch and Fast Gear 12jS180TA manual transmission. The chassis is equipped with a reinforced rear axle balancer suspension, a front axle with an increased payload of up to 8 tonnes, and an integral steering mechanism. The payload of the vehicle is 20 tonnes and the trailer is 24 tonnes.

The results of factory and operational tests confirm the effectiveness of the KrAZ «Karavan-2» grain truck in agricultural enterprises [1].

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND FORMULATION OF THE PROBLEM

The applied theory and practice of road train, all-wheel drive vehicle and off-road vehicles are described in [2, 3, 4], on the basis of which the rational values of energy efficiency and parameters of KrAZ

grain carriers during grain transportation are substantiated [5, 6]. However, these works do not reflect the results of studies on the functional stability of an all-wheel drive truck with instability of the transported cargo weight. In [6], the economic efficiency of using the KrAZ «Karavan-2» grain truck train for transporting grain over a distance of 400-500 km was determined and it was found that its use for short distances (up to 50 km) is impractical.

The performance of road trains is determined by their average speed and carrying capacity. The possibilities for increasing the average speed of road trains are limited [7], so the most promising way to increase productivity is to adjust the speed depending on the density of the grain crop (wheat, barley, oats, etc.), i.e. the volumetric carrying capacity (t/m^3).

Functionally, vehicle stabilisation is assessed by its dynamic properties, which are manifested in the vehicle's response to control influences [8]. This paper proposes using the value of the acceleration (linear or angular) of a car that occurs when creating a controlling influence as a criterion for controllability. It is proposed to use this criterion to evaluate the dynamic properties of a car not only when turning, but also during acceleration and braking, i.e., controllability is characterized by the accuracy of changing the movement parameters in accordance with the driver's desire. Thus, handling is the ability of a vehicle to respond adequately to driving influences. This manifests the dynamic properties of cars while driving, taking into account the applied forces.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The study aims to develop a methodology for the functional adaptation of a grain carrier by adjusting the speed depending on the density of the transported grain crop.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

- to substantiate the functional model of a grain truck;
- to develop a methodology for determining the functional stability of a grain carrier when the weight of the transported grain changes;
- to develop practical recommendations for ensuring the functional adaptation of a grain carrier.

RESEARCH RESULTS

Mathematical modeling of grain truck movement. When a grain truck is moving steadily uphill with an angle α (Fig. 2), the following forces act on it

- gravity G_a , applied at the centre of mass C_a of the vehicle, which can be decomposed into the components $G_a \sin \alpha$ and $G_a \cos \alpha$;
- the air resistance P_w , the point of application of which is at the height of the centre of sail, taken equal to the height h_c ;
- reaction P_h applied to the mechanism of coupling of the vehicle with the trailer at the height h_k (it is assumed that P_h is parallel to the bearing surface);
- normal reactions R_1 and R_2 , shifted by a value $(n+m)$ from the projection of the wheel axles.

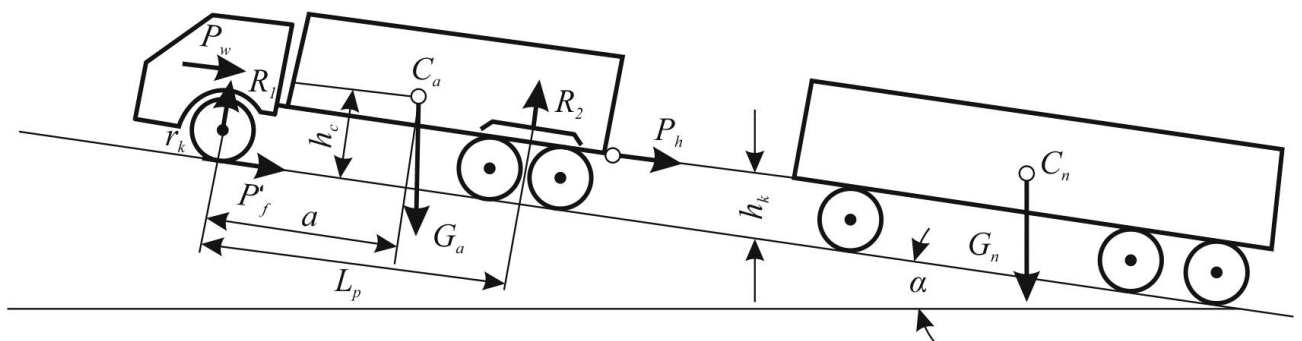


Fig. 2 – Diagram of the forces acting on a grain truck when driving uphill with an angle α

Having compiled the equations of moments of all applied forces relative to the points of applied normal reactions and bearing in mind that the sum of

$$(R_1 + R_2) \frac{n+m}{r_k} = G_a f \cos \alpha,$$

we obtain the following relations for normal reactions:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= G_a \frac{b}{L} \cos \alpha - P_w \frac{h_c}{L} - G_a f \frac{r_k}{L} \cos \alpha - G_a \frac{h_c}{L} \sin \alpha - P_h \frac{h_k}{L}, \\
 R_2 &= G_a \frac{b}{L} \cos \alpha + P_w \frac{h_c}{L} + G_a f \frac{r_k}{L} \cos \alpha + G_a \frac{h_c}{L} \sin \alpha + P_h \frac{h_k}{L}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Neglecting the air resistance ($P_w=0$) and assuming that the driving wheels of the car are the rear wheels, its traction properties are estimated only by the R_2 reaction. Replacing the reaction P_h of the trailer link in equation (1) with its value:

$$P_h = (l_{fv} - 1)G_a(f \cos \alpha + \sin \alpha) = (l_{fv} - 1)P_a,$$

where P_a is the traction force on the driving wheels of the vehicle in the absence of the trailing link; l_{fv} is the vehicle load factor.

In addition, since

$$P_a \frac{h_c}{L} = (G_a \sin \alpha + G_a f \cos \alpha) \frac{h_c}{L},$$

then

$$G_a \frac{h_c}{L} \sin \alpha = P_a \frac{h_c}{L} - G_a f \frac{h_c}{L} \cos \alpha.$$

In this case, transforming equation (1), we obtain

$$R_2 = G_a \frac{a}{L} \cos \alpha + P_a \frac{[h_c(l_{ft} - 1)h_k]}{L} - G_a f \frac{h_c - r_k}{L} \cos \alpha. \tag{2}$$

where l_{ft} is the trailer load factor.

The expression in square brackets in (2) is the reduced height of the centre of gravity of the grain truck, which is greater the higher the load factor and the height of the hitch. For $h_k=h_c$ and the value of the load factor $l_{ft}=D_v$: $D_i=2$, where D_v and D_i are the dynamic factors of the vehicle and trailer, respectively. The traction force of the grain truck with the rear drive wheels at the road adhesion coefficient φ is equal to $P_c=R_2\varphi$. For this case, the dynamic factor of the grain truck in terms of traction is written as

$$D_c = \frac{a\varphi \cos \alpha}{l_{ft}L\varphi - \varphi[h_h + (l_{ft} - 1)h_k]}. \tag{3}$$

Since the last term of equation (2) is negligible (no more than 0.5 % of R_2), the rolling resistance coefficient f is not included in (3).

The variable forces acting on the grain truck are related either to the displacements or to the velocities of the points of application of these forces. The functional relationship that links the magnitude of the force and the kinematic parameters is the characteristic of the force. The force modulus in this relationship can also be a function of the arguments. For ease of calculation, we will assume that the force modulus is a function of the kinetic parameters for given characteristics.

The equations of motion are used to determine the laws of motion of mechanical systems under given forces [9]. The number of these equations for grain carriers with holonomic links is equal to the number of degrees of freedom of the grain carrier. The equations of motion of a grain carrier can be represented in various forms based on the theorem of change of kinematic energy. In the integral form, the equation of motion of a grain truck has the form:

$$\sum_{i=1}^n T_i - \sum_{i=1}^n T_{i0} = \sum_{k=1}^m A_k, \tag{4}$$

where T_{i0} , T_i are the kinetic energy of the link and the grain truck, respectively, at the beginning and end of the time interval under consideration; A_k is the work of each of the external and internal forces acting on the grain truck during a given time interval; n is the number of moving links; m is the number of forces.

Equation (4) is quite cumbersome even for simple traction units, since it is necessary to summarise the forces. For a grain carrier with one degree of freedom, a simpler form of this equation can be obtained, in

which all summation operations are performed in advance. For this purpose, equation (4) is replaced by the equation of motion of a single point of the grain truck, which moves so that its generalised coordinate coincides at any time with the generalised coordinate of the grain truck. The dynamic model of a grain truck will be a material point with mass m_p moving under the action of a force F_n so that the generalised coordinate S of this point coincides with the generalised coordinate of the grain truck at any given time.

It is always possible to determine such values of F_n and m_n that the equation of motion of the actuator point is identical to the equation of motion of the grain truck and, therefore, the generalised coordinate of the actuator point will coincide with the generalised coordinate of the grain truck at any time. In this case, the equation of motion of the fulcrum is written in the form of an energy integral for some finite time interval during which the generalised coordinate changes from S_0 to S , and the reduced mass (for the grain truck, this value is variable) changes from m_n to m_{n0} :

$$\frac{m_n v^2}{2} - \frac{m_{n0} v_0^2}{2} = \int_{S_0}^S F_n dS, \quad (5)$$

where v is the velocity modulus of the point of reference; v_0 is the value of v at $S=S_0$.

To ensure the identity of equations (4) and (5), it is necessary and sufficient to fulfil the conditions:

$$\int_{S_0}^S F_n dS = \sum_{k=1}^m A_k; \quad (6)$$

$$\frac{m_a v^2}{2} = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (7)$$

When the condition in dependence (4) is fulfilled, the condition is also satisfied for any moment of time:

$$\frac{m_{n0} v_0^2}{2} = \sum_{i=1}^n T_{i0}. \quad (8)$$

The reduced force F_n can be found from (6), and the reduced mass m_n can be found from (4). Thus, the reduced force is a force conditionally applied to the point of reduction and is determined from the equality of the elementary work of this force to the elementary work of forces and pairs of forces acting on the links of the grain truck (car, trailer). The equality of elementary work simultaneously means the equality of powers of the elements of the grain truck:

$$F_n v = \sum_{i=1}^m N_k, \quad (9)$$

where F_k is the power of the force (pairs of forces) acting on the grain truck link.

Given the velocity v_k of the point of application of the force F_k acting on the grain truck link, ω_k of the angular velocity of the grain truck link acted upon by a pair of forces with moment M_k , the reduced force F_n is calculated by the formula:

$$F_n = \sum_{k=1}^m \left[F_k \frac{v_k}{v} \cos(F_k, v_k) + M_k \frac{\omega_k}{v} \right]. \quad (10)$$

This sum can be both positive and negative, i.e., the reduced force is a scalar value. The minus sign indicates that the force F_n is directed in the opposite direction to the velocity v of the point of actuation. The reduced force F_n can be considered as a scalar magnitude that coincides with the generalised Lagrange force, which is determined by the ratio of the sum of the possible work of forces applied to the links of the grain truck. From dependence (7) it follows that the reduced mass of the grain truck can be defined as the mass that the point of actuation must have in order for the kinetic energy of this point to be equal to the kinetic energy of the grain truck's links. The kinetic energy of the link

$$T_i = \frac{m_i v_{si}^2}{2} + \frac{J_{si} \omega_i^2}{2}, \quad (11)$$

where m_i is the mass of the link; v_{si} is the modulus of the velocity of the centre of mass of the link; ω_i is the modulus of the angular velocity of the link; J_{si} is the moment of inertia of the link relative to the axis passing through the centre of mass perpendicular to the plane of motion.

Taking into account (11), transforming (7), we obtain the following dependence for estimating the mass of the link

$$m_n = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\frac{v_{si}}{v} \right)^2 + J_{si} \left(\frac{\omega_i}{v} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

In general, to build a dynamic model of a grain truck, any point on the grain truck can be chosen as the point of reference, i.e. the point where the mass is concentrated. Therefore, the reduced mass of a grain truck can be defined as the mass that must be concentrated at the point of actuation so that the kinetic energy of this point is equal to the kinetic energy of the truck and the grain truck trailer.

The reduced force and reduced mass do not depend on the speed of the point of impact, as the formulas for determining them include only the velocity ratios. For example, if the speed modulus of the point of origin v changes by a factor of k , then v_k , v_{si} and ω_i change by the same factor, while their ratios to v remain unchanged. It follows that the determination of the reduced forces and masses can be performed without knowing the velocity of the point of reference, i.e., before solving the equation of motion. This is the main advantage of reduced forces and masses. This conclusion can also be reached by paying attention to the fact that formulas (7) and (8), in addition to the given constants, include only analogues of velocities that do not depend on time.

Let the reduced force F_n be given as a function of the generalised coordinate S (displacement of the point of reference). The reduced mass m_n is a function of the coordinate S . In this case, to determine the law of motion of the actuator, it is convenient to apply the equation of motion in the form of an energy integral with initial conditions $t=0$, $S = S_0^{v=v_0}$. The velocity of the point of reference as a function of the generalised coordinate S is written as

$$v = v_p = \sqrt{\frac{2}{m_n} \int_{S_0}^S F_n dS + \frac{m_n 0}{m_n} v_0^2}, \quad (13)$$

where v_p is the operating speed of the grain truck.

In some cases, the integral in the root expression of formula (13) can be represented in the final form. Then, after integration, we will obtain the function $v=v(S)$ either in the form of a graph or in the form of a series of eigenvalues for changes in displacement S from S_0 to some value that determines the end of the movement stage under consideration.

When estimating the mass of a grain truck according to dependence (12), it is necessary to take into account the density of the transported grain, which can vary within 300-820 kg/m³ depending on the moisture content of the grain, temperature and pressure of the medium, as well as the type of grain transported (Table 1).

The relationship between the mass and volume of grain is defined by the formula $V=m/Q$, where V is the volume, m is the mass (carrying capacity), and Q is the bulk density of grain.

The dependence of the volumetric carrying capacity of the KrAZ-6511C4 grain truck is estimated by the following parameters: Q_n - nominal payload of 15.4 tonnes; Q_{lc} - volumetric payload of 1.3 m³; V_b - body volume of 11.81 m³; V_c - cargo volume of 20.53 m³.

Table 1 – Bulk density of grain crops

№	Name of grain crop	Density, kg/m ³
1	Wheat	750-850
2	Barley	600-750
3	Oats	400-550
4	Rye	700-750

5	Millet	700-850
---	--------	---------

The fuel efficiency of KrAZ grain carriers significantly depends on the volume of transported grain, which was determined during factory tests and by operating organisations using different methods (Table 2) [5].

The test methodology is based on the public road network available near the PJSC «AvtoKrAZ» vehicle manufacturing centre, taking into account the location of road facilities, structures, traffic conditions and terrain. The length of the circular route is 37 km, with sections of traffic in highway and urban conditions, with ascents, descents, bridges, railway crossings, etc. The road surface on the route is asphalt concrete. It is noted that with the increase in the length of the route, the decrease in the density of transported grain crops, fuel consumption decreases (Table 2).

Functional stability of the grain carrier. A grain carrier belongs to the class of complex technical systems, the efficiency of which is ensured over a given period of time when performing its general functions within the limits established by regulatory requirements, provided that external destabilising factors are counteracted.

In general, a grain carrier (Fig. 3) is represented as a system with control function vectors $U(t)$ and disturbance vectors $F(t)$ as input. The output variables characterising the functional parameters of the grain truck are represented by the vector-function $Y(t)$. The dynamic properties of the grain carrier are characterised by the transfer function $W_r = S_o/S_m$, where S_o and S_m are the output and control parameters, respectively.

Table 2 – Results of operational tests of the «Karavan-2» road

Tests	Mileage of the road train during testing, km	Transported cargo, cargo weight, t	«Shoulder» of routes, km	Average fuel consumption, l/10 km	Gear ratio of the main gear
1	Total 2505	Corn grain, 48,83-52,66	87-89	53,0-54,6	$i_{mg} = 6,154$
	With cargo 1250	Sunflower seeds, 27,66	182-194	42,0-42,1	
2	Total 2100	Corn grain, 41,72-47,01	66-69	48,2-50,1	$i_{mg} = 4,9$
	With cargo 1050				
3	Total 1737	Corn grain, 48,7	857	42,0-43,1	$i_{mg} = 4,9$
	With cargo 857				
4	Total 1340	Wheat grain, 40,1	280	37,8-38,0	$i_{mg} = 4,9$
	With cargo 560				
5	Total 1320	Organic mix, 35,0	115	35,0-35,3	$i_{mg} = 4,9$
	With cargo 225	Organic mix, 54,0	110	40,0-42,3	

The grain truck is influenced by both controlled input vectors - control functions ℓ i [$i(t)$ is transmission gear ratio, $q(t)$ is fuel supply, $k(t)$ is steering gear ratio, $p(t)$ is brake control force] and uncontrolled m_i [$R(t)$ is driving resistance, $C(t)$ is road terrain, $B(t)$ is wind loads, etc.] The output variables $Y(t)$ are characterised by the driving speed $v(t)$, the stability of the direction of movement $y_d(t)$ and braking $y_b(t)$, and the stability of the dynamic properties $w(t)$ of the grain truck.

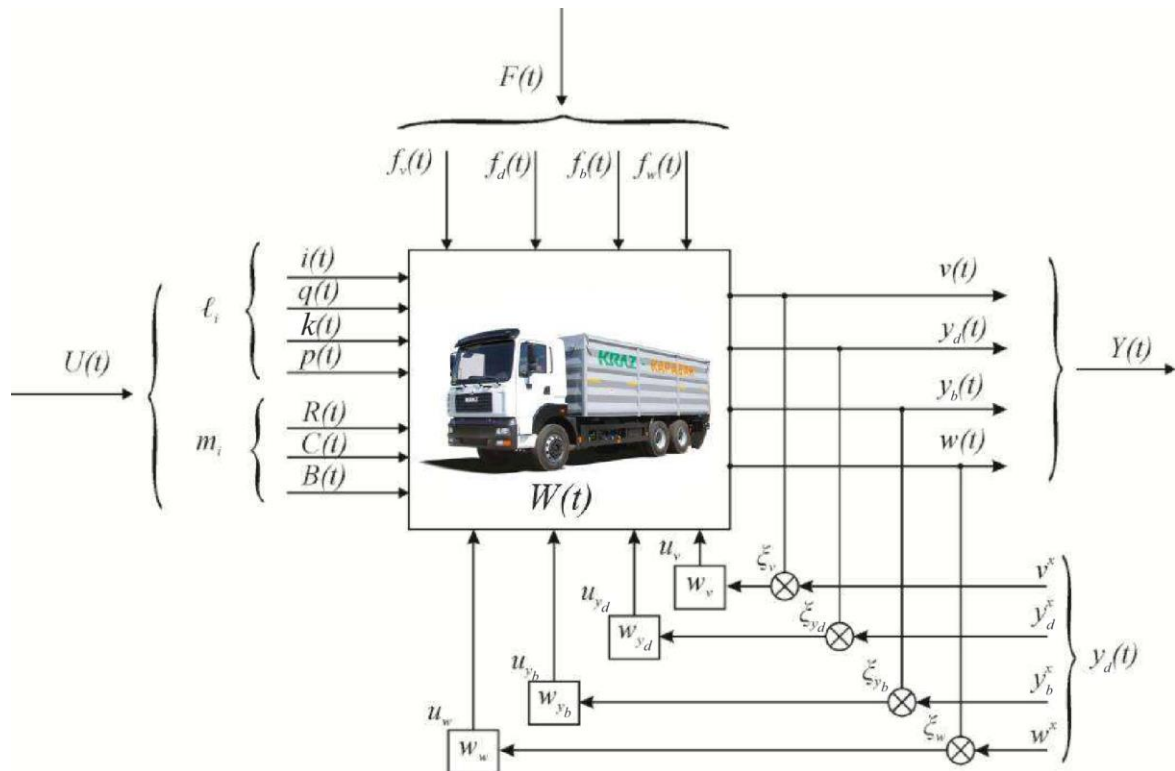


Fig. 3 – Representation of a grain truck as a multidimensional system in a variable state

Typically, disturbances $F(t)$ are determined by the instability of the output (functional) parameters $v(t)$, $y_d(t)$, $y_b(t)$, and $w(t)$. When comparing these parameters with their values v^x , y_d^x , y_b^x and w^x , at which the grain carrier operates stably, the controlled input variables $u(t)$ are adjusted at the comparison links ζ_v , ζ_d , ζ_b and ζ_w .

The functional parameter $v(t)$ is characterised mainly by the input control functions $i(t)$ and $q(t)$ and determines the operational properties of the grain truck, the parameters $y_d(t)$ and $y_b(t)$ are determined mainly by $v(t)$, disturbances in the direction of movement $f_d(t)$ and braking $f_b(t)$ and are aimed at ensuring the safety of the grain truck. The dynamic parameter $w(t)$ characterises the movement of a grain truck in the longitudinal, horizontal and vertical planes under the influence of forces in these planes.

The dynamic space of grain truck operation is based on the metric state space, each element of which fully determines the state of the system under consideration by the functional parameters $v(t)$, $y_d(t)$, $y_b(t)$ and $w(t)$. In case of instability of one or more functional parameters of the grain carrier $v(t)$, $y_d(t)$, $y_b(t)$ and $w(t)$, characterised by deviation from the nominal values of y^x , y_d^x , y_b^x and w^x , it is possible that the grain carrier will lose its functional stability, in which case it will not perform the functions defined by the regulatory and technical documentation (R&D). In this case, the dynamic space of grain carrier operation is determined by the transfer functions W_v , W_{yd} , W_{yb} i W_w , characterised by the relationship $v(t)$, $y_d(t)$, $y_b(t)$, $w(t)$ to y^x , y_d^x , y_b^x , w^x .

During the operation of a grain truck, the task of ensuring its functioning in one of two areas is solved: *OA* - the area of operation in which the grain carrier operates in accordance with its intended purpose (the required traction force, stability of the direction of movement and braking, etc. are ensured); *AF* - the area of optimal operation, for example, according to the energy saving criterion, in which the grain carrier operates at an acceptable change in speed (change in acceleration within acceptable limits) (Fig. 4).

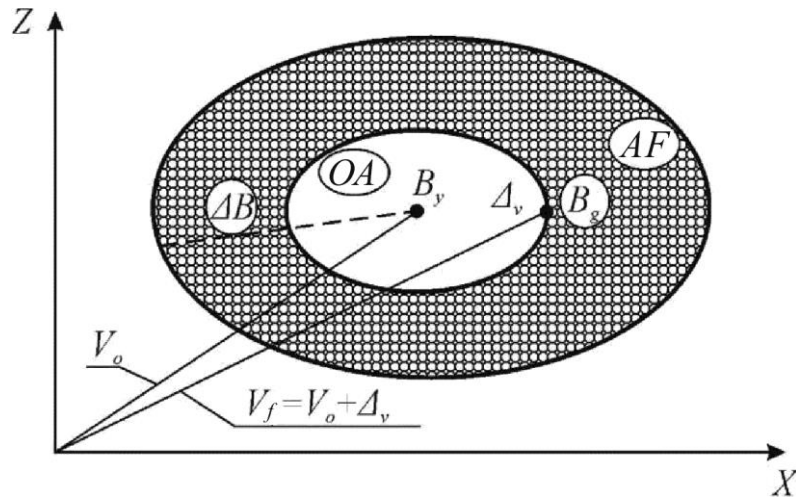


Fig. 4 – Correlation of the areas of optimal operation *OA* of the grain carrier and the functioning *AF* of the grain

In this figure, the points B_y and B_g indicate, respectively, the operation of a grain truck in an unsteady mode of operation without acceleration and the permissible area for energy saving; Δ_v is the margin of optimal operation; V_o, V_f are the vectors of optimal and actual operation, respectively; ΔB is the margin of operation in the *AF* region.

Each point of the *AF* characterises a certain mode of operation of a grain truck at a certain point in time and is described by a certain combination of values of functional parameters, disturbing influences, and the initial state (Fig. 3). The deviation of the point B_g from the point B_y (Fig. 4) reflects the margin of optimal functioning Δ_v of the grain truck

$$\Delta B_z = \frac{z_{jk} - z_{jn}}{z_{jn}} = \frac{\Delta z_j}{\Delta z_{jn}}; \Delta B_x = \frac{x_{ik} - x_{in}}{x_{in}} = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{in}}, \tag{14}$$

where $z_{jk}, z_{jn}; x_{ik}, x_{in}$ are the critical values of the studied and boundary parameters along the x, z coordinates; $\Delta x_j, \Delta x_i$ is the margin of optimal functioning of the grain truck at the value of Δz_{jn} and Δz_{in} .

The margin of optimal functioning Δ_v is the deviation of the functioning vector V_f , whose components are the actual values of the functional parameters, from the nominal vector V_o , i.e. $V_f = V_o + \Delta_v$. In this case, to ensure the operation of a grain carrier in the optimal area of the *OA* (according to Fig. 4), it is necessary to ensure the selection of such nominal values of the functional parameters and tolerance fields for them that ensure the position of the spread and outputs in this region.

Given the known requirements for the optimal functioning of the grain carrier in the area of *OA*, which is determined by the parameters: nominal z_{np} , current z and permissible z_{vp} ($z_{np} < z_{vp}$), the density of distribution of the parameter value, taking into account its spread $f^\circ(x)$ and deviation $f'(x)$, should be determined:

- the probability that the parameter value will not go beyond the specified tolerances ($x_{np} < x < x_{vp}$) during a certain time of grain truck operation, taking into account disturbing influences;
- the tolerance limit ($x_{np} < x < x_{vp}$) and the corresponding requirements for the grain carrier not to exceed the probability of the parameter exceeding the tolerance of the specified permissible probability;
- planes $f(x)$ and $f'(x)$, under which the conditions that the probability of going beyond the tolerance will be less than the permissible probability will be fulfilled.

DISCUSSION OF THE RESULTS OF THE STUDY

To solve this problem, all the functional parameters of the grain carrier are classified by parameters with specified nominal values X_O^C (Fig. 3 – $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$) and into parameters whose optimal value must be determined X_O^V (Fig. 4 - the *OO* region). They are written in vector form:

$$X_o^c = \begin{bmatrix} X_{oi}^c \\ \dots \\ X_{oj}^c \\ \dots \\ X_{oN}^c \end{bmatrix}; X_o^v = \begin{bmatrix} X_{oi}^v \\ \dots \\ X_{oj}^v \\ \dots \\ X_{oM}^v \end{bmatrix} \quad (15)$$

so that any functional parameter of the grain truck is a component of the vectors X_o^c and X_o^v .

Predicting the probability of a grain truck being in the optimal region of functioning of the OA (according to Fig. 4) at time t is determined by the equations of the Markov process:

$$P_i = v_i P_i(t) + v_{i-1} P_{i-1}(t) \quad (16)$$

under nominal conditions $i = 0, 1, 2, 3; t_o = 0; P_i(t) = P_i$.

When assessing the functional stability of a grain truck by only one parameter, for example, by the speed of movement $v(t)$ (Fig. 3), its functioning can be evaluated by the function $\bar{x}_v = (v_1, \dots, v_n)$. The vector \bar{x}_v corresponds to the number $R(\bar{x})$, where $R(\bar{x}) > 0$ and increases to ∞ at $\bar{x}_v \rightarrow \bar{v} = (v_1, \dots, v_n)$, where \bar{v} is the critical vector. $R(\bar{x}_v) \rightarrow \infty$ and at $v_i \rightarrow \bar{V}_i = (V_1, \dots, v_n)$. In this case $R(\bar{x}) = [N_i(\bar{x}_v)]^{\pm 1} / [z(\bar{x}_v)]^2$, where $i=1,2; \alpha > 0$ is an arbitrary number; $z(\bar{x}_v) = \prod_{i=1}^n |v_i - V_i|^{q_i}$; $N_i(\bar{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i|$ and $\alpha_i > 0$ is the weighting factor of v_i ; $q_i > 0$ is an arbitrary number.

When $q=1/(n-1)$, $q > \alpha > 1$, we can write

$$R(\bar{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i| \sqrt{\prod_{i=1}^n (v_i - V_i)}. \quad (17)$$

In this case, the functional stability of the grain carrier in terms of the parameter $v(t)$ is estimated using the following dependence

$$H(\bar{x}_v) = 1/R(\bar{x}_v). \quad (18)$$

This function describes the functioning of the grain truck provided that v_i reaches the value V_i when changing $H(\bar{x}_v)$ within the range from H_{max} to 0 (when $v_i = V_i$), characterising the functional stability of the grain truck in terms of speed $v(t)$.

Similarly, the functional stability of the grain truck can be assessed by the stability of the direction of movement $y_d(t)$ and braking $y_b(t)$, the stability of the dynamic properties $w(t)$ (Fig. 3). In this case, the critical values of these parameters, which are in the area of the AF functioning (Fig. 4), are selected according to experimental data based on the method of partial accelerations [10], which is effectively used in assessing the dynamic properties and stability of vehicles [11].

Using the standard form of recording the variable state of a grain truck, we consider its movement as the movement of an autonomous dynamic system when the forces of resistance to movement and the amount of energy used for movement change. This influence usually causes a change in the speed $v(t)$ of translational motion, which is characterised by equation [12]

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{P_k - \sum R_c}{m_{ag}}, \quad (19)$$

where P_k is the moving force of the unit (tangential traction force); $\sum R_c$ is the sum of the forces of

resistance to the movement of the unit; m_{ag} is the reduced mass of the unit.

The forces of resistance to the movement of a grain carrier during operation depend on factors, many of which are variable, such as terrain, speed, instability of the mass of transported grain, etc. As the drag forces change, the dv/dt changes during grain transport. Measurement of the acceleration dv/dt requires the use of appropriate metrological support for measuring and registration complexes that will allow determining its kinematic and dynamic parameters without interfering with the design of the grain truck [13]. The basis of this complex is capacitive semiconductor three-axis acceleration sensors – accelerometers, which are installed on the car and trailer of the grain truck to assess longitudinal and lateral accelerations.

The combination of the acceleration sensors with the KrAZ-6511C4 navigation system allows to receive on-line and archive information, the analysis of which provides reliable data on the route and modes of movement of the grain truck, instant and average fuel consumption and direction of movement.

CONCLUSIONS

The study of the functional adaptation of a grain truck with an unstable mass of transported grain revealed that fluctuations in the grain load during transportation significantly affect the stability of the vehicle, especially during manoeuvring and braking. When estimating the weight of a grain truck, it is necessary to take into account the density of the transported grain. The dependence of the volumetric carrying capacity of a grain truck is estimated by the parameters of nominal carrying capacity, volumetric carrying capacity, body volume, and cargo volume.

The dynamic space of grain truck operation is based on the metric state space, each element of which fully determines the state of the system under consideration according to certain functional parameters. If one or more functional parameters of a grain truck are unstable and deviate from their nominal values, the grain truck may lose its functional stability, in which case it will not perform the functions defined by the regulatory and technical documentation. In this case, the dynamic space of grain carrier operation is determined by transfer functions.

During the operation of a grain carrier, the task of ensuring its operation in one of two areas is solved: the area of operation in which the grain carrier operates in accordance with its intended purpose (ensuring the required traction force, stability of the direction of movement and braking, etc.); the area of optimal operation, for example, according to the energy saving criterion, in which the grain carrier operates at an acceptable change in speed (change in acceleration within acceptable limits). To ensure that the grain carrier operates in the optimal range, it is necessary to select such nominal values of functional parameters and their tolerance fields that ensure the position of the spreading and outlet fields in this range.

REFERENCES

- [1] Stehantseva D., (2013) «AvtoKrAZ» stvoryv dlia khliborobiv unikalnyi zernovoznyi avtopoizd KrAZ-6511S4 «Karavan». Tekhnika i tekhnologii APK, № 10 (49), 22-23.
- [2] Platonov V. F., (2016) Povnopryvidni avtomobili. Kharkiv: KhNADU, 312.
- [3] Buriennikov Yu. A., Kashkanov A. A., Rebedailo V. M., (2013) Avtomobili: robochi protsesy ta osnovy rozrakhunku: navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNTU, 283.
- [4] Zanko R. V., Krainyk L. V., Horbai O. Z., (2019) Osnovy konstruktyvnoho syntezu ta dynamika spetsialnykh avtomobiliv i tekhnolohichnykh mashyn [monohrafiia]. Lviv: Vyd-vo Lvivskoi politekhniky. 256.
- [5] Dun S.V., Pavlenko A.V. (2015) Vyznachennia ratsionalnykh znachen enerhoosnashchenosti ta parametriv transmisii avtopoizdiv-zernovoziv KrAZ. Avtomobilnyi transport. Naukovo-vyrobnychii zhurnal, № 3 (245), 10-14.
- [6] Dun S., Klapan V., (2013) Tekhniko-ekspluatatsiini kharakterystyky avtopoizda dlia perevezennia silskohospodarskykh vantazhiv. Kommercheskyye avtomobyly, № 10, 2-4.
- [7] Barabash O. V., Kravchenko Yu. V., (2002) Funktsionalna stiikist – vlastyvist skladnykh tekhnichnykh system. Zb. nauk. prats. NAOU. Biul. № 40: NAOU, 225-229.
- [8] Podryhalo M. A., Sheludchenko V. V., (2015) Nove v teorii ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobiliv ta traktoriv. Navch. posibn., Sumy: Sumskiy natsionalnyi ahraryni universytet, 213.
- [9] Syvak R. I., Derevenko I. A., (2014) Korotkyi kurs teoretychnoi mekhaniky. Vinnytsia: VNAU. 155.
- [10] Artomov M. P., Lebediev A. T., Podryhalo M. A., ta insh. (2025) Metod partialnykh pryskoren ta yoho zastosuvannia v dynamitsi mobilnykh mashyn. Kharkiv Vyd-vo «Estet Print», 232.
- [11] Abramov D. V., Podryhalo N. M., Podryhalo M. A., Polianskyi O. S., Faist V. L., (2014) Dynamichni vlastyvosti y stabilnist funktsionuvannia avtotransportnykh zasobiv [Monohrafiia]. Kh.:

KhNADU. 204.

[12] Bilokon Ya. Yu., Okocha A. I., (2002) Traktory i avtomobili. K.: Urozhai, 318.

[13] Lebediev A. T., Lebediev S. A., Korobko A. I., (2018) Kvalimetriia ta metrolohichne zabezpechennia vyprobuvan traktoriv [Monohrafiia]. Pid red. Lebedieva A. T., Kharkiv: Vyd-vo «Miskdruk», 394.

A. Коробко, І. Семенов, Функціональна адаптація зернового при нестабільній масі зерна, що перевозиться

Запропоновано методику функціональної адаптації зернового шляхом регулювання швидкості залежно від щільності транспортуємої зернової культури. В результаті дослідження функціональної адаптації зернового з нестабільною масою транспортуємої зернової культури встановлено, що коливання зернового вантажу під час транспортування істотно впливають на стійкість транспортного засобу, особливо під час маневрування та гальмування. При оцінці ваги зернового необхідно враховувати щільність транспортуємого зерна. Об'ємна вантажопідйомність зернового ретельно оцінюється шляхом встановлення функціональної залежності від таких параметрів, як номінальна вантажопідйомність, об'ємна вантажопідйомність, об'єм кузова та об'єм вантажу. Динамічний простір експлуатації зернового базується на метричному просторі станів, кожен елемент якого повністю визначає стан розглянутої системи за певними функціональними параметрами. Якщо один або декілька функціональних параметрів зернового нестабільні і відхиляються від номінальних значень, зерновоз може втратити функціональну стабільність і не виконувати функції, визначені нормативною та технічною документацією. У таких випадках динамічний робочий простір характеризується передавальними функціями, які забезпечують математичну основу для аналізу поведінки системи. Під час експлуатації зернового вирішується завдання забезпечення його функціонування в одній з двох областей: області роботи або області оптимальної роботи. Щоб забезпечити роботу зернового в оптимальній області, необхідно підібрати такі номінальні значення функціональних параметрів і поля допусків, щоб забезпечити положення розкиду і виходів в цій області.

Ключові слова: функціональна адаптація, зерновоз, зернова маса, нестабільність маси, прискорення, рівняння руху.

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: 09.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1908

Kyrylakha S.V.
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

MATHEMATICAL MODELLING OF THERMOMECHANICAL STATE IN ADDITIVE MANUFACTURING AND WELDING OF TITANIUM ALLOYS FOR TRANSPORT ENGINEERING

This study demonstrates a detailed investigation of residual stress distribution and thermomechanical behavior in Ti80 and Ti-6Al-4V titanium alloy components subjected to welding and post-weld treatments, integrating both experimental measurements and finite element simulations. The aim of the study is to evaluate the influence of welding sequence, thermal cycles, and temperature-dependent material properties on stress evolution, with particular emphasis on transverse and longitudinal residual stresses concentrated near weld toes. The relevance of this research is determined by the high demands for reliability, dimensional stability, and fatigue resistance of welded titanium components in transport, aerospace, and engineering applications. Significant anisotropy in stress distribution was observed along and across weld seams, highlighting critical regions prone to distortion or fatigue initiation. The novelty of this research lies in the comparative analysis of two titanium alloys under different welding conditions, combining experimental results with numerical simulations to provide a comprehensive understanding of residual stress development and thermomechanical responses. The work further demonstrates the effectiveness of post-weld heat treatment (PWHT) and local stress-relief procedures in mitigating residual stresses, enhancing both dimensional stability and fatigue performance. Practical implications of this study include guidance for optimizing welding parameters, implementing appropriate post-weld treatments, and improving the reliability and service life of high-performance titanium components in transport, aerospace, and engineering applications. The findings contribute to the broader understanding of the interplay between welding conditions, material behavior, and stress evolution, offering a foundation for improved predictive modeling and informed design decisions in welded titanium structures, and highlighting the significance of temperature-dependent properties in accurately forecasting residual stress fields and deformation patterns.

Keywords: Ti80, Ti-6Al-4V, residual stress, thermomechanical properties, post-weld heat treatment, FEM, welding, additive manufacturing.

INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM) and modern welding processes are increasingly employed for transport-sector components because they enable near-net shaping of complex, lightweight, and high-performance titanium structures; nevertheless, these thermal processes inherently generate steep temperature gradients that result in significant residual stresses and deformations which compromise dimensional accuracy and fatigue life [1].

Residual stress fields produced during layerwise deposition or multi-pass welding not only induce part distortion but also interact with service loads, accelerating crack initiation and reducing structural reliability. Consequently, accurate prediction and control of the thermomechanical state throughout the manufacturing-to-service chain is essential for reliable design in transport engineering.

Titanium alloys commonly used in transport applications, notably Ti-6Al-4V and related grades, exhibit strong temperature-dependent mechanical and metallurgical responses, including phase transformations, low thermal diffusivity, and strain-rate sensitive plasticity. Realistic predictive models must therefore incorporate temperature-dependent constitutive data and, where relevant, transformation kinetics [2].

Although various numerical strategies, ranging from full-scale transient finite element method (FEM) simulations to reduced-order and layer-equivalent models, have been developed to forecast residual stresses and distortions, current approaches frequently omit critical factors relevant to transport-scale parts. These include the coupling of metallurgical transformations during cooling, the influence of complex geometry and deposition or welding paths, and the need for rigorous experimental validation under representative component-scale boundary conditions [3].

Furthermore, downstream operations such as machining, cutting, post-weld or post-build heat treatments, and electrical discharge machining (EDM) can substantially redistribute or partially relax surface and subsurface residual stresses. This underscores the necessity of considering post-processing as an integral part of predictive workflows for accurate lifecycle assessment [1].

Therefore, this study systematically evaluates current modeling approaches for predicting the thermomechanical state in titanium alloys during welding and additive manufacturing, critically assessing their capabilities and limitations for capturing residual stresses, deformations, and phase transformations. Emphasis is placed on the relevance of these approaches to transport engineering applications, providing a

foundation for the development of more reliable predictive tools to enhance the performance, dimensional stability, and service life of titanium-based transport components [4, 5].

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

Recent investigations have demonstrated the critical role of residual stresses in determining the dimensional stability and fatigue performance of titanium components produced by additive manufacturing (AM) and welding processes [1]. Significant progress has been achieved in developing numerical models capable of predicting thermal gradients and resulting stress fields in complex geometries, yet challenges remain when simulating multi-pass deposition and intricate transport-scale components.

Several studies have provided a significant contribution by coupling thermomechanical simulations with phase transformation kinetics, thereby improving the accuracy of residual stress predictions for Ti-6Al-4V alloys [3]. Other works have investigated for the first time the influence of deposition path and interpass temperature on the formation of local stress concentrations, highlighting the importance of process planning for minimizing distortion and fatigue risk [2].

Moreover, the effects of post-processing operations such as machining, cutting, heat treatment, and electrical discharge machining (EDM) have been systematically analyzed, showing that residual stress redistribution can significantly modify the structural response of transport-relevant components [2]. These findings emphasize that lifecycle modeling must integrate both manufacturing and post-processing stages to achieve reliable performance predictions.

A particularly significant contribution in the field of residual stresses and thermomechanical behavior of titanium alloys is the work by Nagarjun et al. (2025) [6]. This study investigated the effects of high-temperature deformation and welding on the microstructure and thermomechanical properties of Ti-6Al-4V alloys. The authors systematically analyzed the temperature-dependent behavior of the material, including phase transformations, thermal expansion, density, and specific heat capacity, with particular emphasis on the α -phase (hexagonal close-packed structure) and its influence on mechanical properties.

The study demonstrates the critical role of high-temperature processing and welding on the evolution of microstructure and residual stresses, providing insights into deformation mechanisms and phase stability under thermal and mechanical loading. By combining experimental characterization with thermomechanical analysis, this research has made a significant contribution to understanding how residual stresses and deformations develop in titanium components, which is essential for improving the reliability, dimensional accuracy, and fatigue performance of transport-sector parts.

Overall, Nagarjun et al. (2025) provide a comprehensive assessment of the interplay between thermal history, microstructural evolution, and mechanical response in Ti-6Al-4V, establishing a foundation for predictive modeling of residual stress formation in additive manufacturing and welding processes. This work is particularly relevant for developing integrated models that incorporate thermal, metallurgical, and mechanical interactions, bridging the gap between laboratory studies and large-scale transport applications [6].

Despite these advances, gaps remain in fully capturing the interplay between thermal history, metallurgical transformations, and mechanical response under conditions typical for large-scale transport components. In particular, few studies provide experimental validation at component scale, limiting confidence in the predictive accuracy of current models [1].

The present work addresses these gaps by providing a systematic evaluation of modeling strategies for predicting the thermomechanical state of titanium alloys during additive manufacturing and welding. The study demonstrates for the first time an integrated approach that combines thermal, mechanical, and metallurgical phenomena while considering complex geometry and post-processing effects. This approach allows for more reliable predictions of residual stress distribution, deformation, and phase evolution, thereby supporting the design of high-performance titanium components for transport applications [6, 7].

A particularly significant study in this field is the comprehensive review of residual stress formation, measurement techniques, and mitigation methods in metal additive manufacturing processes [6, 7, 8; 9-11]. This work provides a solid foundation for understanding current modeling approaches and highlights areas requiring further research, aligning closely with the objectives of the present study.

RESEARCH AIM AND OBJECTIVES

The primary aim of this study is to systematically evaluate and enhance predictive modeling approaches for the thermomechanical state of titanium alloys during additive manufacturing and welding processes, with a focus on transport-sector components. This includes accurate assessment of residual stresses, deformations, and phase transformations under realistic process and post-processing conditions.

To achieve this aim, the following research objectives are defined:

- 1.To review and synthesize current modeling techniques for predicting thermal, mechanical, and metallurgical behavior in titanium alloys during AM and welding.
- 2.To identify limitations in existing approaches regarding the treatment of complex geometries, multi-pass deposition, and interaction between thermal history and phase transformations.
- 3.To propose and validate an integrated modeling framework that incorporates thermomechanical interactions, phase transformations, and the effects of post-processing operations.
- 4.To provide practical guidelines for the application of predictive models in transport engineering, aiming to improve dimensional stability, structural performance, and service life of titanium components.

RESULTS OF THE STUDY

In the present work, the residual stress distribution and thermomechanical behavior of Ti80 butt-welded thick plates were systematically analysed. According to Wu (2023), the transverse welding residual stress along the X-axis exhibited an asymmetric double-peak distribution near the weld zone, with a maximum tensile stress of approximately 655 MPa. These results are illustrated in Figure 1 (Test and simulation results of transverse welding residual stress) [4].

The comparison of experimental and simulated results demonstrates a generally good agreement, with minor discrepancies at the weld centre attributed to geometrical unevenness and testing limitations. The stress distribution shows an asymmetric bimodal pattern, with peak stresses concentrated near the weld toe, gradually decreasing with distance from the weld zone. This behaviour highlights the influence of multi-pass welding on the development of residual stresses and confirms the validity of the finite element model for predicting stress evolution in titanium alloy thick plates.

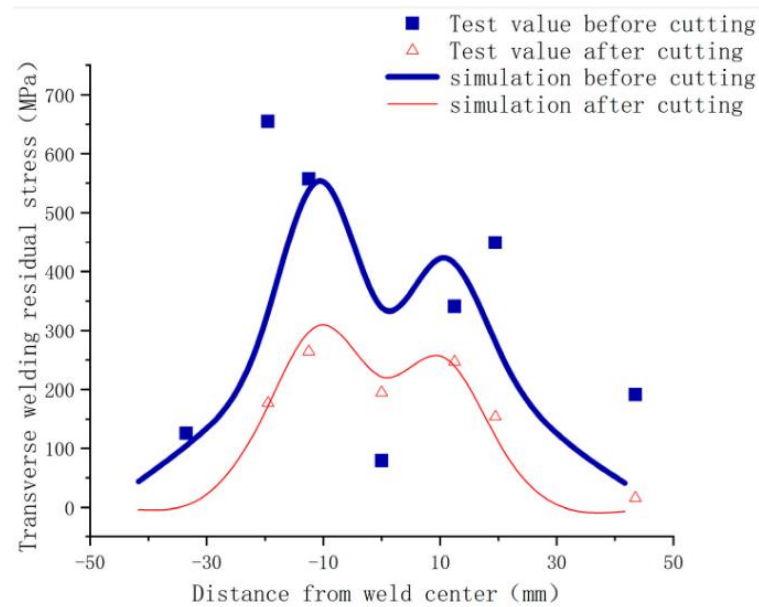


Fig. 1. Test and simulation results of transverse welding residual stress (X-axis) before and after cutting [4]

The longitudinal welding residual stress along the Y-axis, shown in Figure 2 (Simulation results of longitudinal welding residual stress before and after cutting), indicated higher tensile stress than the transverse component. Simulation results generally agreed with experimental data, except at the weld centre, where measurement discrepancies arose due to uneven weld geometry and X-ray focusing limitations. Peak longitudinal residual stresses were concentrated near the weld toe and decreased gradually with distance.

These findings indicate that longitudinal residual stresses are the dominant component in Ti80 butt-welded thick plates, with peak values substantially higher than transverse stresses. The redistribution observed after cutting reflects the stress relaxation mechanism, suggesting that post-weld operations such as machining significantly influence the residual stress state and may contribute to improved dimensional stability.

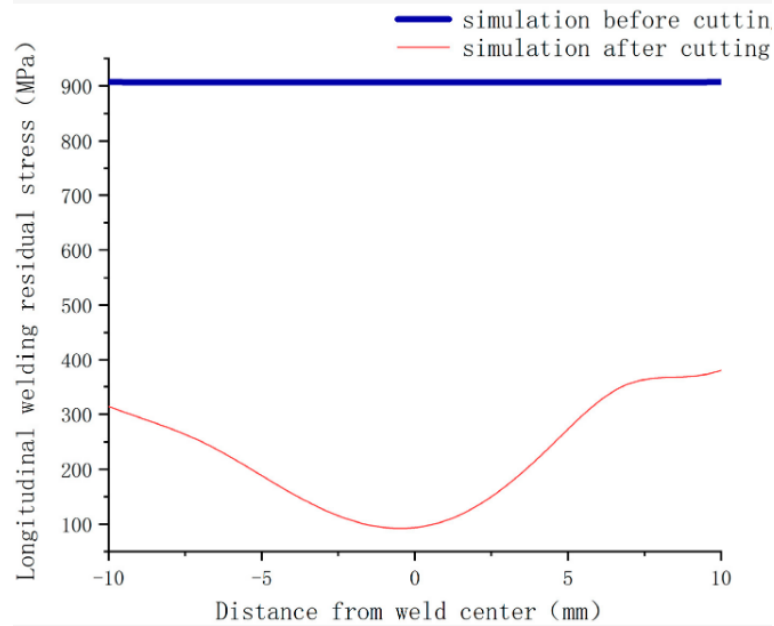


Fig. 2. Simulation results of longitudinal welding residual stress (Y-axis) before and after cutting [4]

Material properties of Ti80 were characterised by a yield strength of approximately 800 MPa, tensile strength of 913 MPa, yield-to-tensile ratio of 0.87, and Poisson's ratio of 0.3 at room temperature. Stress-strain relationships at various temperatures, presented in Figure 3 (Stress versus strain plots for Ti80 at different temperatures), demonstrate the temperature-dependent mechanical behaviour, highlighting a reduction in yield and tensile strength with increasing temperature [9].

The stress-strain behaviour confirms that Ti80 exhibits excellent strength at ambient conditions but undergoes pronounced thermal softening at elevated temperatures. This temperature dependence is critical for welding simulations, as it directly affects the development of residual stresses and potential distortion. The results also validate the material model used in the finite element analysis, ensuring accurate prediction of thermomechanical responses under realistic welding conditions.

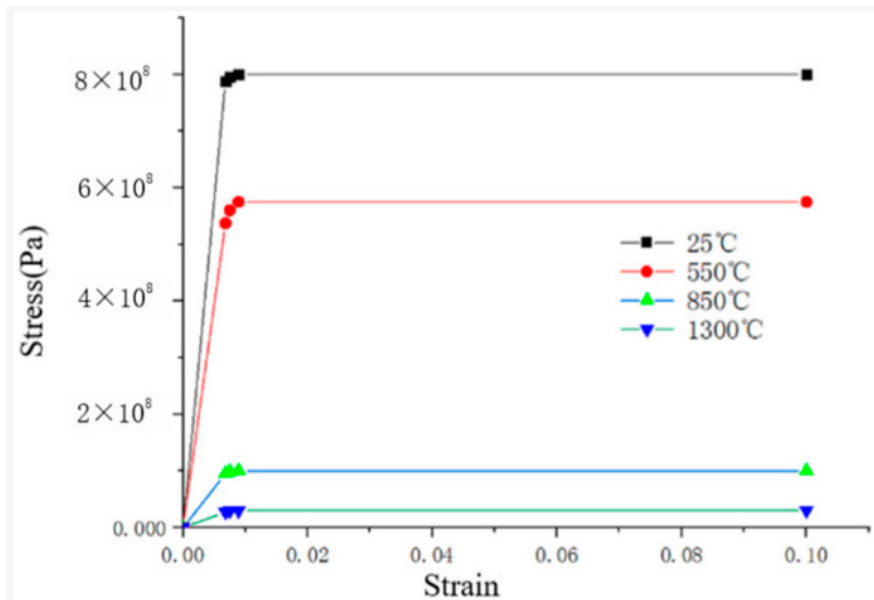


Fig. 3. Stress versus strain plots for Ti80 at different temperatures [10]

Key observations from the analysis include:

1. The weld zone exhibits pronounced residual tensile stress concentration, primarily in regions adjacent to the weld toe.
2. The transverse residual stress distribution shows an asymmetric bimodal profile, reflecting the influence of the welding sequence and surface geometry.

3. Longitudinal residual tensile stress exceeds the transverse tensile stress, indicating anisotropy in stress development along and across the weld seam.

4. Numerical simulations capture the overall stress distribution trends effectively, providing reliable insight into the thermomechanical state of the welded component.

Analysis: Residual stress is highly localized near the weld toe and sensitive to welding parameters. The asymmetry in the transverse stress distribution suggests that even minor variations in welding sequence or surface geometry can produce significant differences in stress concentration. Stress–strain curves reveal a pronounced temperature dependence of Ti80, which must be considered in predictive modelling of deformation and residual stress evolution. Integration of transverse and longitudinal stress data provides a comprehensive understanding of potential sites for distortion or fatigue initiation in transport-sector titanium components.

In conclusion, these results emphasize the importance of combining experimental validation with numerical simulation to accurately predict residual stress fields, thereby informing design and post-processing strategies for high-performance titanium parts. In the analysis of TIG-welded Ti-6Al-4V plates subjected to local post-weld heat treatment (PWHT), the finite element model included 93,950 3D elements and 107,678 nodes. According to Liu et al. (2023), the thermal and mechanical properties of the material varied with temperature, obtained through interpolation and extrapolation of low-temperature performance parameters, as illustrated in Figure 4 (Temperature-dependent thermo-physical and thermo-mechanical material properties of Ti-6Al-4V) [11].

The results presented in Figure 4 (Temperature-dependent thermo-physical and thermo-mechanical material properties of Ti-6Al-4V used in the finite element model) [11] clearly demonstrate the strong temperature sensitivity of Ti-6Al-4V during welding and subsequent post-weld heat treatment. As shown in the thermo-physical data (Figure 4a), both thermal conductivity and specific heat capacity increase substantially with temperature, which directly influences heat flow and cooling rates across the weld zone. This behavior is particularly critical for predicting transient temperature fields and resulting microstructural evolution, as higher conductivity at elevated temperatures promotes more uniform heat distribution, while increased specific heat moderates the thermal gradients.

The thermo-mechanical properties (Figure 4b) further highlight the pronounced reduction in elastic modulus and yield strength with increasing temperature, accompanied by significant changes in thermal expansion coefficients. Such temperature-dependent softening directly affects stress development, making the alloy more susceptible to plastic deformation under residual stress accumulation during multi-pass welding. Importantly, the finite element implementation of these properties ensures more realistic simulation outputs, as constant material parameters would underestimate stress redistribution and distortion effects. These findings confirm that accurate incorporation of temperature-dependent material behavior is indispensable for reliable prediction of thermomechanical responses in welded titanium alloys. Moreover, the data underscore the necessity of localized stress-relief treatments, since mechanical performance degradation at high temperatures may exacerbate residual stress concentrations if left unmitigated.

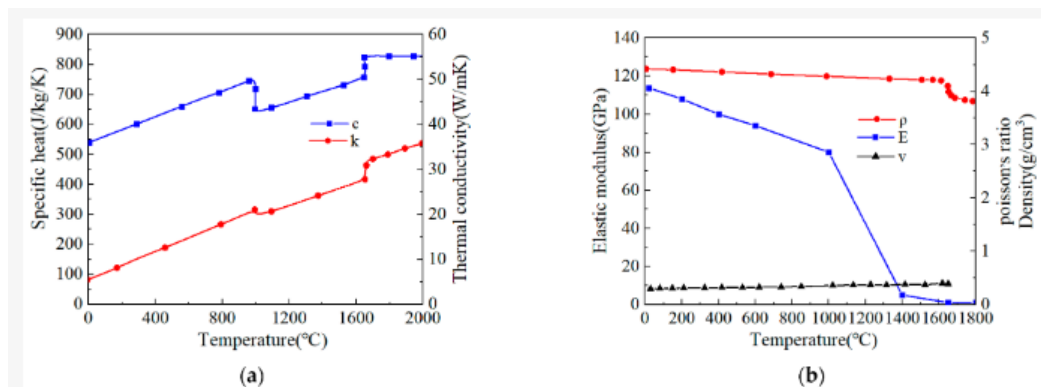


Fig. 4. Temperature-dependent (a) thermo-physical and (b) thermo-mechanical material properties of Ti-6Al-4V used in the finite element model [11]

Residual stresses were investigated along multiple observation paths on the weldments, divided into three main regions. The first region included paths P1–P4 on the top side of the weld, with distances from the weld centerline of 0, 5.5, 7.5, and 10.4 mm. The second region covered paths P5–P8 on the bottom side, at

similar distances from the weld centerline. Figures 5 present the distribution of longitudinal and transverse residual stresses along paths P9 and P10 after welding, with and without stress relief treatment (SSPT) [11].

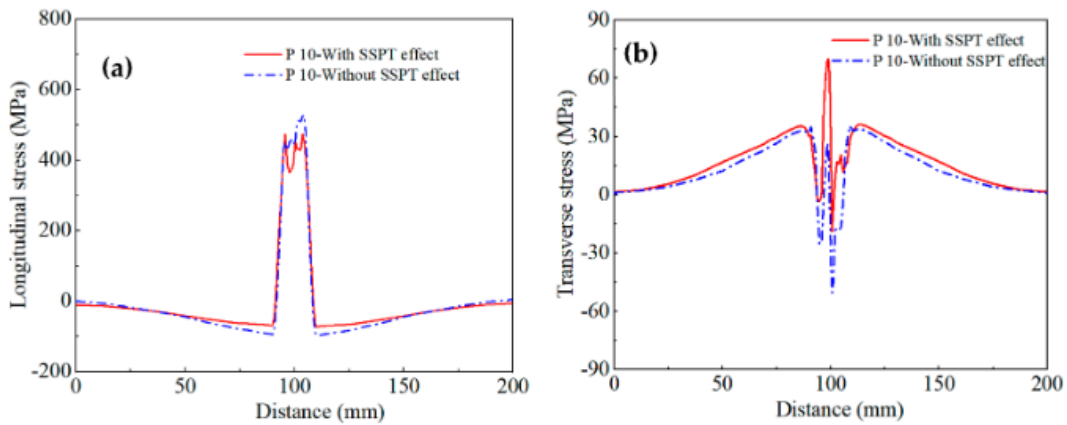


Fig. 5. Distribution of (a) longitudinal and (b) transverse residual stress along path P10 after welding with and without SSPT [11]

The stress distributions along path P10 (Figure 5) reveal pronounced and spatially localized residual tensile peaks in both longitudinal and transverse components immediately adjacent to the weld seam following welding, while application of synchronous servo press treatment (SSPT) produces a clear and systematic reduction of these peaks [11]. Quantitatively, SSPT reduces the maximum longitudinal tensile stress more substantially than the transverse component, producing a flatter, more uniform profile along the analysed path and shifting the stress field toward lower tensile (or more compressive) mean values. Spatially, the longitudinal stresses display sharper gradients near the weld toe compared with the transverse stresses, indicating that load-parallel (along-seam) directionality concentrates strain and locking-in of tensile residuals more effectively than the cross-seam direction. The post-treatment profiles also evidence partial redistribution of stresses away from the immediate toe region toward broader, lower-magnitude fields, which is consistent with plastic relaxation and controlled constraint introduced by SSPT. From an engineering perspective, these changes imply a reduced risk of fatigue crack initiation at the weld toe and a lower propensity for out-of-plane distortion; they also validate SSPT as an effective localized stress-relief measure for welded Ti alloys. For predictive modelling, the results underscore the need to include both the mechanistic effect of localized mechanical compression (as in SSPT) and temperature-dependent plasticity in simulations to reproduce post-treatment stress redistribution accurately.

Key observations from the analysis of these figures include:

1. Longitudinal residual stresses along both top and bottom paths were generally higher than the transverse residual stresses, indicating anisotropy in residual stress development.
2. Application of SSPT significantly reduced both longitudinal and transverse residual stresses across all observation paths, demonstrating the effectiveness of local post-weld heat treatment in mitigating stress concentrations.
3. The residual stress distributions exhibited notable variations along the different paths, reflecting the combined effects of welding sequence, thermal cycles, and geometry of the weldments.
4. Temperature-dependent material properties strongly influenced stress redistribution, as regions with higher local temperatures showed more pronounced stress relaxation.

Analysis: These results indicate that post-weld heat treatment is a critical factor in controlling residual stresses in TIG-welded Ti-6Al-4V components. The anisotropy between longitudinal and transverse stress components underscores the importance of path-specific analysis for predicting potential distortion or fatigue-prone areas. The combination of top- and bottom-side observation paths provides a comprehensive understanding of residual stress fields, which is essential for the design and maintenance of transport-sector components. Furthermore, integrating temperature-dependent properties into the simulation ensures more accurate predictions of stress evolution under realistic thermal cycles.

In summary, the study demonstrates the significant influence of PWHT on the reduction of residual stresses and highlights the necessity of considering temperature-dependent material behavior in predictive modelling of welded titanium components.

DISCUSSION OF RESULTS

The combined analysis of residual stress distributions and thermomechanical behavior in Ti80 and Ti-6Al-4V welded components reveals several key patterns and implications for welding and post-weld treatment strategies.

Ti80 butt-welded thick plates exhibit pronounced residual tensile stress concentrations near the weld toe, with transverse residual stress showing an asymmetric double-peak distribution and longitudinal residual stress exceeding the transverse component. Stress-strain behavior across different temperatures indicates a reduction in yield and tensile strength with increasing temperature, emphasizing the importance of temperature-dependent properties in predictive modeling.

In TIG-welded Ti-6Al-4V plates, post-weld heat treatment (PWHT) effectively reduces both longitudinal and transverse residual stresses along multiple observation paths. Temperature-dependent material properties strongly influence stress redistribution, with higher local temperatures promoting stress relaxation. The distribution of residual stresses along different paths indicates that weld sequence, geometry, and thermal cycles significantly affect stress localization.

Comparative analysis of these studies highlights several critical observations:

1. Longitudinal residual stresses consistently exceed transverse stresses in both materials, reflecting directional sensitivity of stress accumulation relative to the weld seam.
2. Peak tensile stresses are concentrated near weld toes, which are potential sites for distortion or fatigue initiation.
3. Reduction of material strength with increasing temperature and the facilitation of stress relaxation via PWHT underscore the necessity of incorporating temperature-dependent properties into simulations and post-weld design strategies.
4. Post-weld heat treatment significantly mitigates residual stress concentrations, enhancing fatigue performance and dimensional stability.
5. Numerical simulations align closely with experimental measurements, validating FEM approaches and confirming reliable prediction of residual stress patterns when thermal and mechanical material behaviors are accurately represented.

Own interpretation and implications: The integration of results from both studies indicates that advanced welding process control combined with post-weld treatments is essential to ensure the structural integrity of high-performance titanium components. The observed anisotropy and localization of residual stresses underscore the need for path-specific analysis in component design and maintenance. Temperature-dependent material properties must be explicitly considered in simulations to predict deformation accurately and optimize welding sequences. Additionally, post-weld heat treatment strategies provide a practical means to reduce residual stress concentrations, thereby enhancing fatigue performance and dimensional stability.

Overall, these findings contribute to a deeper understanding of the interplay between welding parameters, thermal cycles, material behavior, and residual stress evolution in titanium alloys. They provide guidance for future design, simulation, and experimental studies aimed at improving the performance and reliability of welded titanium components in transport and engineering applications.

CONCLUSIONS

Based on the integrated analysis of residual stress distributions and thermomechanical behavior in Ti80 and Ti-6Al-4V welded components, the following conclusions can be drawn:

1. Both Ti80 and Ti-6Al-4V welded plates exhibit pronounced residual tensile stress concentrations near weld toes, with longitudinal stresses exceeding transverse stresses, indicating anisotropic stress accumulation along and across weld seams.
2. The asymmetric distribution of transverse residual stresses in Ti80 and the variations along different observation paths in Ti-6Al-4V highlight the significant influence of welding sequence, geometry, and thermal cycles on stress localization.
3. Temperature-dependent material properties critically affect stress development and redistribution. Incorporating these properties into predictive models is essential for accurate simulation of thermomechanical behavior.
4. Post-weld heat treatment (PWHT) and local stress-relief techniques, such as synchronous servo press technology (SSPT), are highly effective in mitigating residual stress concentrations, enhancing fatigue performance, and improving dimensional stability of welded titanium components.
5. The combination of experimental validation and numerical simulations provides a reliable framework for predicting residual stress evolution, informing design strategies and post-processing requirements for high-performance titanium alloys in transport and engineering applications.

6. These findings contribute to a deeper understanding of the interplay between welding parameters, thermal cycles, material behavior, and residual stress evolution, providing guidance for optimizing welding processes, reducing distortion, and improving service performance of welded titanium components.

REFERENCES

1. Rashid A., & Gopaluni A. (2023) A Review of Residual Stress and Deformation Modeling for Metal Additive Manufacturing Processes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2(4), 100102, <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100102>.
2. Bastola N., Muhammad P. J., Rangasamy N. & Rakurty C. S. (2023) A Review of the Residual Stress Generation in Metal Additive Manufacturing: Analysis of Cause, Measurement, Effects, and Prevention. *Micromachines*, 14(7), 1480, <https://doi.org/10.3390/mi14071480>.
3. Qu M., Gu Z., Li X., Yi L., Li Yi, Yu Ge & Zhao Ya. (2024) Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution Mechanisms of Ti6Al4V Alloy under Hot Stamping Conditions. *Materials*, 17(11), 2531, <https://doi.org/10.3390/ma17112531>.
4. Wu Q., Bo C., Sun K. & Li Li. (2025) Redistribution of Residual Stresses in Titanium Alloy Butt-Welded Thick Plates Due to Wire-Cut Electrical Discharge Machining *Metals*, 15(7), 750, <https://doi.org/10.3390/met15070750>.
5. Fayazfar H., Salarian M., Rogalsky A., Sarker D., Russo P., Paserin V., & Toyserkani E. (2018) A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 144, 98-128, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.018>.
6. Nagarjun J., Senthil M. Vel, Swaminathan G., Saravanakumar N., John Rozario Jegaraj J., Yoganand G. & Mastanaiah P. (2025) Effects of High-Temperature Deformation and Welding on Microstructure and Thermomechanical Properties of Ti-6Al-4V. *J. of Materi Eng and Perform.* <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11066-z>.
7. Shu-guang Chen, Han-jun Gao, Yi-du Zhang, Qiong Wu, Zi-han Gao, & Xin Zhou (2022) Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches. *Journal of Materials Research and Technology*. 17, 2950-2974, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.054>.
8. Yang Y., Jin X., Liu C., Xiao M., Lu J., Fan H. & Ma S. (2018) Residual Stress, Mechanical Properties, and Grain Morphology of Ti-6Al-4V Alloy Produced by Ultrasonic Impact Treatment Assisted Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals*, 8(11), 934; <https://doi.org/10.3390/met8110934>
9. Shi, C., Zhong, Q., Li, C. *China Materials Engineering Canon*. Chemical Industry Press: Beijing, China, 2006.
10. Wang, Y.X., Guo, J.T., Zhang, B.W., Ge, K.K., Li, L.B., Lv, F. (2024) Effect of Residual Stress on the Ultimate Bearing Capacity of Titanium Alloy Pressure Spherical–Cylindrical-Combined Shells. *Metals*, 14, 123.
11. Liu J., Zheng J., Fu B., Bu L., Li R. & Liu S. (2023) Thermo-Mechanical Study of TIG Welding of Ti-6Al-4V for Residual Stresses Considering Solid State Phase Transformation. *Metals*, 13(5), 1001, <https://doi.org/10.3390/met13051001>.

Кирилах С.В. Математичне моделювання термонапруженого стану при адитивному виготовленні та зварюванні титанових сплавів для транспортного машинобудування

У роботі показано детальне дослідження розподілу залишкових напружень та термомеханічної поведінки компонентів із титанових сплавів Ti80 та Ti-6Al-4V, які піддавались зварюванню та післязварювальній обробці, із інтеграцією експериментальних вимірювань та чисельного моделювання методом скінченних елементів. Метою дослідження є оцінка впливу послідовності зварювання, термічних циклів та температурозалежних властивостей матеріалу на еволюцію напружень, з особливим акцентом на поперечні та поздовжні залишкові напруження, зосереджені біля швів. Актуальність роботи визначається високими вимогами до надійності, геометричної стабільності та втомостійкості зварних титанових компонентів у транспортній, авіаційній та інженерній галузях. Виявлено значну анізотропію розподілу напружень уздовж та поперек швів, що дозволяє виділити критичні ділянки, схильні до деформацій або початку втомних тріщин. Новизна дослідження полягає у порівняльному аналізі двох титанових сплавів за різних умов зварювання, який поєднує експериментальні дані та чисельні моделі для комплексного розуміння формування залишкових напружень та термомеханічної поведінки. У роботі також показано ефективність

післязварювальної термічної обробки (PWHT) та локальних методів зниження напружень у зменшенні залишкових напружень, підвищенні геометричної стабільності та втомостійкості. Практичне значення роботи полягає у формуванні рекомендацій щодо оптимізації параметрів зварювання, застосування післязварювальної обробки та підвищення надійності і ресурсу експлуатації високопродуктивних титанових компонентів у транспортній, авіаційній та інженерній сферах. Отримані результати сприяють кращому розумінню взаємодії між умовами зварювання, поведінкою матеріалу та еволюцією напружень, закладаючи основу для вдосконалення прогнозного моделювання та обґрунтованого проектування зварних титанових конструкцій, а також підкреслюють значення температурозалежних властивостей для точного передбачення полів залишкових напружень і деформаційних процесів.

Ключові слова: Ti80, Ti-6Al-4V, залишкові напруження, термомеханічні властивості, післязварювальна обробка, FEM, зварювання, адитивні технології.

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

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 ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

Дата надходження статті до видання: 03.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1909

Pavlenko O.V., Yelistratov V.O., Chernysh A.A., Kharkov O.A.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine

IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING ELECTRIC VEHICLE TRACTION BATTERY HOUSINGS TO PROTECT AGAINST IMPACT DAMAGE

On modern electric vehicles, the traction battery is installed from below on the bottom of the body, which reduces the height of the vehicle's center of gravity and improves the vehicle's lateral stability during curved movement. The disadvantage of this arrangement is the increased risk of damage and destruction of the protective housing and, accordingly, the battery's electrical elements, which are dozens of ordinary household lithium-ion batteries of the AAA type. But the housings of these electrical elements are manufactured using a special technology that helps increase the strength of the housing and from a material with high heat dissipation. It is shown that the traction battery is the most expensive component of an electric vehicle. Therefore, the development of production methods aimed at increasing its service life is an urgent task.

The mechanical characteristics of anisotropic material were taken into account during the manufacture of reinforced containers for electrical element housings. Data were determined that reliably reflect the influence of the stretching coefficient, planar anisotropy and the initial diameter of the work piece on the critical thickness of its plate. An expression was obtained that takes into account all the characteristics of the technological process that affect the thickness of the initial work piece. This allows you to control these characteristics in order to optimize the thickness of the work piece. The dependence obtained as a result of the study allows you to accurately and qualitatively calculate the optimal thickness of the initial work piece at the stage of developing the technological process for manufacturing battery cell housings for electric vehicles.

Key words: electric car, lithium-ion battery, battery protection, anisotropic materials.

INTRODUCTION

Electric cars are becoming widespread due to environmental friendliness, efficiency, cheapening their production, increasing the power reserve on a single charge and developing the infrastructure for their maintenance. In general, compared to an internal combustion engine, an electric motor loses less energy by friction, does not require a complex lubrication system and almost does not wear out. Therefore, many modern electric vehicles have a power plant with a capacity of 368 + kW and accelerate faster than cars with internal combustion engines. For example, Porsche Taycan Turbo S electric motors develop a power of 560 kW and accelerate the specified vehicle to 100 km/h in 2.8 s [1].

The most expensive component of an electric car is a power battery. It consists of a certain number of standard batteries that form a battery of the desired voltage, operating current and power. The combination of such a set is determined by the structure of the electric vehicle power system. Its shape and volume is determined by the layout of the electric vehicle.

In order to reduce the height of the center of mass of the electric car, manufacturers place traction batteries on the bottom of the body. To do this, make the battery as a separate module, which has a minimum height. Or install several modules of traction batteries of different sizes for different places of the electric car.

However, this solution increases the likelihood of physical damage to the lower wall of the traction battery housing, which can lead to the impossibility of movement and the release of hazardous substances. Therefore, traction batteries for electric vehicles are manufactured using a special technology that increases the strength of the battery case and uses materials with high heat dissipation. In addition, the development of production methods aimed at increasing the service life of traction batteries is an urgent task.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

THE IMPLEMENTATION OF THE ABOVE-DESCRIBED DESIGNS OF TRACTION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES LED TO THE EMERGENCE OF A COMPLETELY UNDERSTANDABLE SOLUTION – THE DEVELOPMENT OF A REINFORCED DESIGN OF THE BOTTOM OF THE BATTERY CASE [2].

Typical materials for standard AAA battery housings are polyethylene or polypropylene based materials. The problem with using polymers for the housing is that these materials have a low thermal conductivity and therefore create unfavorable thermal conditions for traction batteries when they are heated during a significant load on the power system.

But the metal walls of the traction battery housing, due to greater elastic and plastic deformation, can better withstand impacts. The disadvantage of metal walls of the housing is their significantly greater weight. The greater weight of the metal wall is also a consequence of the use of their manufacturing technology.

One of the directions for reducing the weight of the metal wall of the traction battery housing is the

optimal choice of the thickness of the work piece. It is necessary to take into account the mechanical characteristics of the metal when manufacturing reinforced housings for electrical elements.

During cold deformation of metals, it is necessary to take into account the effect of hardening and initial anisotropy of the metal on the final and intermediate stages of forming [3].

During plane anisotropy, an additional load is applied to some parts of the internal contour of the work piece and simultaneous unloading of others [4].

However, the calculation of the stability of compressed sections of a sheet metal work piece during cold deformation is a typical problem of the theory of plasticity [5]. And to obtain a satisfactory solution for determining the ultimate thickness of the work piece for the drawing process, it is necessary to take into account the phenomenon of metal hardening and anisotropy of the mechanical properties of the metal [6].

PURPOSE AND OBJECTIVE OF THE STUDY

The purpose of the work is to theoretically justify the initial thickness of the work piece from which, due to the deformation hardening and anisotropy of the mechanical properties of the material, more durable housings of battery cells can be made. Further theoretical research aimed at taking into account all the features of the production technology of metal battery cases in order to justify the choice of thickness of blanks to reduce their weight.

RESEARCH RESULTS

During the flat anisotropy, in comparison with the drawing, the isotropic material there is an additional load of some parts of the inner contour of the blank flange and simultaneous unloading of others. This process significantly worsens the conditions of the hood. As a result, corrugations and festoons are formed on the end of the work piece. Consequently, it is necessary to take into account the phenomenon of strengthening and anisotropy of the work piece due to the accurate calculation of the stress and deformation fields of the work piece. It is also necessary to determine the intervals of unpressurized stamping. To do this, it is effective to use theoretical models that are more adequate in describing the physical process of cold deformation.

The main condition for a successful sheet metal plastic deformation process is to maintain the stability of the sheet metal plastic formation process. In the event of a loss of form stability, significant local deformations occur, which usually leads to a rupture of the work piece or to a marriage. Ensuring the stability of the plastic forming process reduces the percentage of defects, improves the quality of the product and contributes to the reliable operation of automatic machines.

Based on the Euler scheme, the occurrence of waviness of the sheet surface is formed in areas with excessive compressive or compressive-tensile stresses.

Most of the published work on this type of buckling concerns the formation of waviness on a flat flange during deformation of parts such as bodies of revolution. In the analyzed works, the solution of the problem of flange stability was considered by analogy with the solution of the problem of elastic-plastic bending of a compressed rod by the Engesser-Karman method. It was assumed that the formulas for the elastic bending of plates and shells are valid for the case of bending beyond the elastic limit of the metal. To do this, the modulus of elasticity should be replaced by the reduced modulus of elasticity.

The exact solution of the problem of analyzing the stress state of the flange of the sheet anisotropic work piece during deep plastic deformation has certain mathematical difficulties. To obtain a solution to such a problem, a number of assumptions were made: we neglect the change in the thickness of the blank flange, that is, we believe that its flange is in conditions of flat deformation; plastic orthotropy of sheet metal arising in the process of plastic deformation of anisotropic material is rather small and does not have a significant effect on its initial anisotropy; there is no Bauschinger effect; metal behavior obeys the laws of elastic-plastic hardened medium in the corrugation zone; forces increase slowly and deformation rates are small; plastic deformation process is considered to be a uniform deformation process consisting of a set of consecutive balanced plastic states, each of which corresponds to a certain stage of loading. To obtain a satisfactory solution for determining the limit thickness of the work piece for the drawing process without pressing, it is necessary to take into account the phenomenon of metal hardening and anisotropy of the mechanical properties of the metal. Make assumptions allow you to find a solution on the basis of which you can determine the parameters of the tool and work piece; determine the parameters of technological operations that do not lead to defects.

In work [7], dependencies for calculating the critical thickness of an anisotropic work piece without corrugation are shown

$$s_k = \frac{3}{\pi} b \sqrt{2\mu|\sigma_u| \frac{L_k}{E_p}}, \quad (1)$$

where b – flange width; μ – coefficient that depends on anisotropy; σ_u – main normal tangential stresses acting in the direction of the anisotropy axis;

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{N}{M}; \\ M &= B_1 \frac{b^2}{a^2} + B_2 \frac{a^2}{b^2} + B_3; \\ N &= F_1 + F_2 \frac{a^2}{b^2}; \\ B_1 &= \frac{3}{2} \left(\frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{c_{22}}{g} - \frac{4\psi}{3K_\sigma} \right); \\ B_2 &= \frac{3}{64} \left(\frac{c_{11}}{g} - \frac{\psi}{K_\sigma} m_\sigma^2 \right); \\ B_3 &= \frac{3}{4c_{33}} + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) \left(\frac{c_{12}}{g} + \frac{4\psi}{3K_\sigma} m_\sigma \right); \\ F_1 &= \left(\frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right) \beta; \\ F_2 &= \frac{1}{8} m_\sigma; \\ \psi &= \frac{3}{4} (1 - n); \\ g &= c_{11}c_{22} - c_{12}^2; \\ K_\sigma &= c_{11} + 2c_{12}m_\sigma + c_{22}m_\sigma^2; \end{aligned}$$

$m_\sigma = \sigma_v/\sigma_u$ – the ratio of the main normal stresses in the anisotropy axes; E_p – modulus of plasticity of anisotropic material; n – constant value (strengthening index) that characterizes the ability of the metal to strengthen; a – half a wave length; β – the coefficient is selected within c_{11} , c_{12} , c_{22} – anisotropy constants.

In work, the data obtained from the results of a study similar to the above are given for the relative critical thickness of the plate, which provides stretching without corrugation, taking into account anisotropy: for steel 08kp – $s_k = 0,0247 \pm 0,0003$, for brass – $s_k = 0,0299 \pm 0,0004$.

Previously [8], dependencies have been obtained to calculate the thickness of the preform, which provides stretching without pressing the flange. The results of these calculations have some discrepancies with the empirical expressions of Schofman L. I. The thickness of the plate determined from them is somewhat larger, which leads to an increase in the weight of the final product. Therefore, it becomes necessary to finalize the theoretical result by taking into account the strengthening and anisotropy of the starting metal of the work piece.

We will clarify the resulting dependencies in accordance with assumptions that are consistent with the theory of plasticity of the anisotropic body of R. Hill: plastic orthotropy of sheet metal; sheet metal anisotropy acquired during plastic deformation is insignificant and has no significant effect on its initial anisotropy; the work piece material is compressed; metal strengthening isotropic; no Bauschinger effect.

The expression for the cross section of the anisotropic metal module of the work piece will be

$$E_{ca} = \mu c_{11} E_c, \quad (2)$$

For a material with circular symmetry at $R_x = R_y = R_0$; $R_{xy} = \frac{R_0}{1 + 2R_0}$; $c_{11} = c_{22}$; $\Delta = 0$;

$c_{13} = c_{23} = 0$ from (2) we will have

$$E_{c\alpha} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1+R_0}{2+R_0} E_c, \quad (3)$$

Taking into account the anisotropy, we will find the

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \sigma_{ec} \ln \frac{r_H}{r}, \quad (4)$$

where

$$\psi = \frac{(c_{11} + c_{12})(c_{22} + c_{12})}{c_{11} + 2c_{12} + c_{22}} - c_{12},$$

$$\mu = \frac{3}{2 \left(1 + \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right)}.$$

Then the ratio to the critical thickness of the blank plate will be

$$h^2 = 0,041 \frac{2}{3} \frac{r_H^2}{E_c} \frac{2+R_0}{1+R_0} \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \sigma_{ec} \ln \frac{r_H}{r}. \quad (5)$$

Imagine the plasticity index E_c and the average intensity of stresses, taking into account the strengthening of the material in the form of

$$E_c = C \varepsilon_i^{n-1}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ec} = C \varepsilon_i^n, \quad (7)$$

where C, n – constants of the material, determined by experiments on the stretching of samples.

Substituting these formulas into expression (5) and performing the necessary transformations taking into account $\varepsilon_i = 0,5\varepsilon_0$ we will get

$$h^2 = 0,041 \frac{r_H^2}{3} \frac{2+R_0}{1+R_0} \left(1 - \frac{r}{r_H} \right) \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \ln \frac{r_H}{r}. \quad (8)$$

We express the anisotropy coefficients μ, ψ through their parameters, substitute one of the roots of the Bessel function and as a result we get

$$h^2 = 0,0045 r_H^2 \frac{2+R_0}{1+R_0} \left(1 - \frac{r}{r_H} \right) \sqrt{\frac{2(1+R_0)}{1+2R_0}} \ln \frac{r_H}{r}. \quad (9)$$

We will calculate for the following deformation parameters of the work piece: $d = 25$ mm, $D = 40$ mm, $R_0 = 1$.

Then

$$h^2 \geq 0,0045 \cdot 20^2 \cdot \frac{3}{2} \left(1 - \frac{12,5}{20} \right) \sqrt{\frac{4}{3}} \ln \frac{20}{12,5} \geq 0,545$$

and

$$h \geq 0,738 \text{ mm.}$$

When comparing the results obtained from formulae [7, 8] as well as (9) with the buckling condition, it can be seen that taking into account the anisotropy of the material makes it possible to more accurately determine the critical thickness of the starting metal of the work piece. The discrepancy is not more than 8,5% (Fig. 1). In Fig. 1, the following designations are adopted: h – the thickness of the work piece, calculated according to the dependence (9); s – billet thickness calculated by L. I. Schofman's formula; r_H – initial radius of work piece.

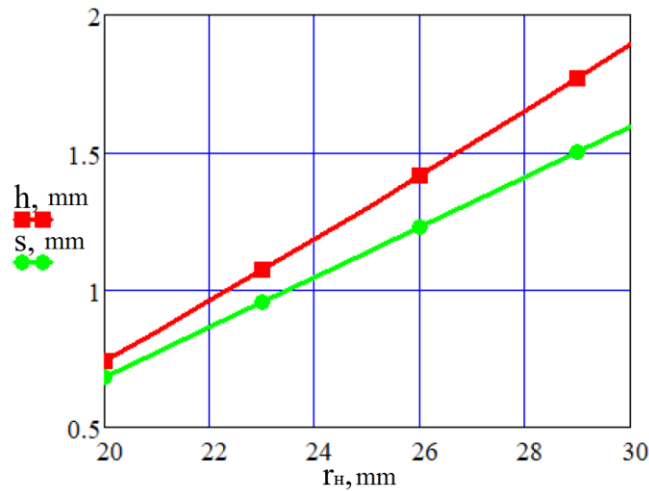


Figure 1 – Change in thickness of the work piece from its initial radius

Figure 1 shows that the results of the calculations are almost the same, but with an increase in the initial diameter of the work piece and, accordingly, the degree of deformation, the thickness increase increases for formula (9) than for the empirical equation of L. I. Shofman. This suggests that the analytical expression (9) quite adequately describes the dependence of the thickness of the work piece on its dimensions.

Analyzing the expression (9), it can be concluded that by increasing the anisotropy index from 0,5 to 2, the critical thickness of the required work piece decreases. The flange of the work piece of material with a large R0 index will be more stable under deformation. This coincides with the data of Golovlev V. D. and Zharkov V. A., who say that with an increase in anisotropy indicators, the resistance to deformation of the blank flange decreases and the limit degree of stretching increases [10]. However, flat anisotropy generally adversely affects the deformation process of the material and worsens the conditions of formation [11]. In this case, the thickness of the work piece should be increased by 1,6-2 times compared to the deformation of the isotropic metal (Fig. 2). In Fig. 2, the following designations are adopted: h is the thickness of the work piece, calculated according to dependence (9), taking into account anisotropy and the phenomenon of metal strengthening during deformation; s – billet thickness calculated by formula [10], excluding the above parameters; r_H is the initial radius of the work piece.

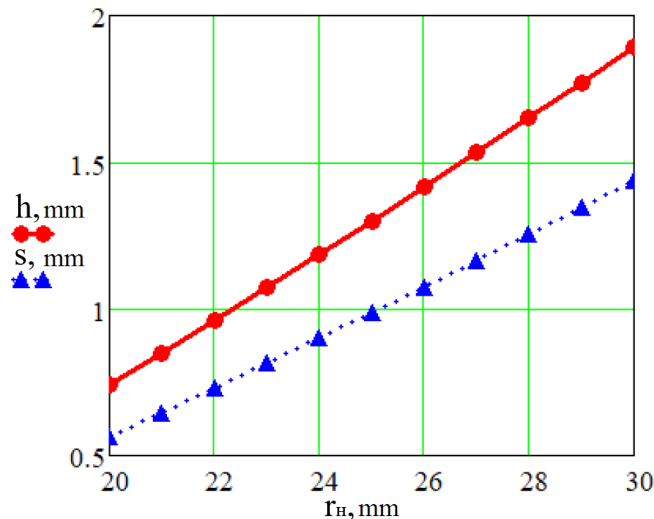


Figure 2 – Change in the thickness of the work piece depending on the increase in its initial radius

It is also interesting to compare the results of calculations with the formula of V. Golovlev (1) and experimental data [12]. We will perform the calculation for the following conditions: $d = 45 \text{ mm}$, $D = 90 \text{ mm}$. For steel 08kp $R_0 = 1,706$. We find the relative critical thickness of the plate $\bar{h} = s/D$

$$h^2 \geq 0,0045 \cdot 45^2 \cdot \frac{2+1,706}{1+1,706} \left(1 - \frac{22,5}{45}\right) \sqrt{\frac{2(1+1,706)}{1+2 \cdot 1,706}} \ln \frac{45}{22,5} \geq 4,785,$$

$$h \geq 2,19 \text{ mm}$$

and

$$\bar{h} = \frac{2,19}{90} = 0,0243.$$

According to the expression of Golovlev V. D. $\bar{h} = 0,0237$, according to experimental indicators Yakovleva S. S. $\bar{h} = 0,0247$, according to L. I. Shoffman's empirical formula $D - d \leq (18 \dots 22)s \bar{h} = 0,0227$. The greatest discrepancy between the results was found with the data of Shofman L. I. and is approximately equal to 6%.

CONCLUSION

From the above study, we can conclude that the results of calculations for expression (9) correlate well with the data obtained earlier. The determined data reliably reflect the influence of the stretching coefficient, flat anisotropy and the initial diameter of the work piece on the critical thickness of its plate. At the same time, almost all the characteristics of the technological process that affect the thickness of the initial work piece are explicitly contained in the resulting expression. This allows you to control these characteristics in order to optimize the thickness of the work piece. The dependence obtained as a result of the study allows accurate and qualitative calculation of the optimal thickness of the initial work piece at the stage of development of the technological process of manufacturing the bodies of battery cells of electric vehicles.

For example, the specific gravity of steel is $7,85 \text{ g/cm}^3$ and that of dense polyethylene is $0,95 \text{ g/cm}^3$. Then, according to simple calculations, the weight of the steel case of the battery cell with dimensions of $10 \times 50 \times 0,8 \text{ cm}$ will be determined at $8,9 \text{ g}$, and the polyethylene case with dimensions of $10 \times 50 \times 2,5 \text{ cm}$ will be only $2,79 \text{ g}$. That is, the polymer case of the battery cell will be lighter than the steel one almost 3 times.

Nevertheless, to protect the passengers of electric vehicles, automakers produce metal cases of battery cells. But if you increase the thickness of the steel body by $0,2 \text{ mm}$, the weight of the element will increase to $10,95 \text{ g}$, which is 2 g more than the previous calculation. Therefore, the relevance of the above study to determine a more accurate value of the thickness of the blanks of the battery cell bodies, taking into account the mechanical characteristics of their material, is not in doubt.

REFERENCES

1. Sandrini G., C  B., Tomasoni G., Gadola M., Chindamo D. (2021). The Environmental Performance of Traction Batteries for Electric Vehicles from a Life Cycle Perspective. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 700–716. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0053>.
2. Arshad F., et al. (2020). A Comprehensive Review of the Advancement in Recycling the Anode and Electrolyte from Spent Lithium Ion Batteries. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(36), 13527–13554. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04940>.
3. Arhat R., Puzyr R., Shchetynin V., Levchenko R., Pedun O. (2022). The Stress State of the Workpiece at the Radius of Matrix Rounding During Drawing, Considering the Bending Moment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 479-488, DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_47.
4. Puzyr R., Puzyr V., Kulynych V., Havrylov D., Dolhikh O., Horshkov A. (2023). Problems in the Manufacture of Hydrogen Fuel Cells Bipolar Plates *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System*, MEES.
5. Altenbach H., Kolupaev V.A. (2024). Reviewing Yield Criteria in Plasticity Theory. In: Altenbach, H., Hohe, J., Mittelstedt, C. (eds) *Progress in Structural Mechanics. Advanced Structured Materials*, vol 199. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45554-4_2.
6. Kulynych V., Chebenko V., Puzyr R., Pieieva I. (2021). Modeling the influence of gaseous products of explosive detonation on the processes of crack treatment while rock blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 102-107, DOI: 10.33271/MINING15.03.102.
7. Puzyr R., Shchetynin V., Vorobyov V., Salenko A., Arhat R., Haikova T., Yakhin S., Muravlov V., Skoriak Y., Negrebetskyi I. (2021). Improving the technology for manufacturing hollow cylindrical parts for vehicles by refining technological estimation dependences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1-114), 56 - 64, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.244241.
8. Puzyr R., Klimov E., Chernish A., Chernenko S., Sira Y. (2021). The Optimal Conditions for Adding Strain to the Deformation Zone During the Expansion of Automobile Pipe Adapters. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 104-113, DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_11.

9. Parida A. K., Soren S., Jha R. N., Krishnamurthy N. (2016). Cylindrical Cup Manufacturing Using 12 mm Thick Circular Blanks of AISI 1040 Graded Medium Carbon Steel: an Innovative Approach. *ISIJ International*, 56(8), 1452-1461. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-675>.

10. Symonova A., Drahobetskyi V., Kulynych V. (2024). Enhancing Service Life and Durability of Machine Parts Through Surface Plastic Deformation. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_29.

11. Pavlenko O., Yelistratov V., Levchenko R., Kozlov R., Kharkov O. and 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*, 1-5, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402405.

12. Zagirnyak M. V. and Drahobetskyi V. V. (2015). New methods of obtaining materials and structures for light armor protection. *International Conference on Military Technologies (ICMT), Brno, Czech Republic*, 1-6, doi: 10.1109/MILTECHS.2015.7153695.

Павленко О.В., Єлістратов В.О., Черниш А.А., Харьков О.А. Удосконалення технології виготовлення корпусів тягових акумуляторних батарей електромобілів для захисту від ударних пошкоджень

На сучасних електромобілях тяговий акумулятор встановлюється знизу на днищі кузова, що зменшує висоту центру ваги транспортного засобу та покращує поперечну стійкість автомобіля під час криволінійного руху. Недоліком такого розташування є підвищений ризик пошкодження й руйнування захисного корпусу та, відповідно, електричних елементів акумулятора, якими є десятки звичайних побутових літій-іонних акумуляторів типу ААА. Але корпуси цих електричних елементів виготовляються за спеціальною технологією, що сприяє підвищенню міцності корпусу, та з матеріалу з високою тепловіддачею. Показано, що тяговий акумулятор є найдорожчим компонентом електромобіля. Тому розробка методів виробництва, спрямованих на збільшення терміну його експлуатації, є актуальним завданням.

Проведено урахування механічних характеристик анізотропного матеріалу під час виготовлення посиленних контейнерів для корпусів електричних елементів. Визначено дані, які достовірно відображають вплив коефіцієнта розтягування, площинної анізотропії та початкового діаметра заготовки на критичну товщину її пластини. Отримано вираз, який враховує всі характеристики технологічного процесу, що впливають на товщину початкової заготовки. Це дозволяє контролювати ці характеристики з метою оптимізації товщини заготовки. Отримана в результаті дослідження залежність дозволяє точно та якісно розрахувати оптимальну товщину вихідної заготовки на етапі розробки технологічного процесу виготовлення корпусів акумуляторних елементів для електромобілів.

Ключові слова: електромобіль, літій-іонний акумулятор, захист акумулятора, анізотропні матеріали.

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.

ЄЛІСТРАТОВ 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.

ЧЕРНИШ Андрій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: chernyshkrnu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9711-827X.

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.

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.

Andrii CHERNYSH, PhD, Associate Professor of the Department of automobiles and tractors Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: chernyshkrnu@gmail.com, ORCID: 00000000-0002-9711-827X.

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.

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1910

Halyna Pivtorak, Yevhen Pruskyi
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine

USING CLUSTER ANALYSIS TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF MICRO-FREIGHT FLOWS OF SHOPPERS

The article presents the results of a study aimed at identifying socio-demographic and behavioral factors influencing people's choice of transport mode during shopping trips. Considering the increasing volume of shopping-related trips and the growing attention to the environmental aspects of urban mobility, the study examines the phenomenon of micro-shopping flows as part of the broader urban freight transport system.

The study is based on an online survey of 479 respondents. Using hierarchical clustering, two main clusters of shoppers were identified. The first cluster consists of middle-aged individuals, predominantly women, who combine active employment with medium-weight purchases (2–5 kg), mostly during daytime hours, and prefer traveling by private car or on foot. The second cluster primarily comprises students who make small purchases (up to 2 kg), more often after 3:00 p.m., often combining public transport and walking.

The results confirm the presence of statistically significant differences between the groups in terms of age, gender, occupation, shopping time, and purchase weight. A clear relationship was found between purchase weight and choice of transport mode: as the weight increases, the likelihood of using a private car rises significantly. Similarly, temporal characteristics influence modal choice — walking predominates in the morning hours, while the share of car and public transport trips increases in the afternoon.

The practical significance of this study lies in providing a scientific basis for developing targeted sustainable transport planning measures aimed at specific user groups. For young people, it is advisable to focus on improving access to public transportation and developing micro-mobility infrastructure. For the working population, effective measures may include incentives to reduce private car use.

Future research prospects are related to modeling the impact of micro-shopping flows on overall urban traffic. Such analysis is important for managing peak loads in the transport system and for developing policies aimed at the environmentally sustainable development of urban transport.

Keywords: shopping trip, cluster analysis, socio-demographics indicators, mode choice, micro freight flows

INTRODUCTION

Despite the growing popularity of online shopping, travel demand for shopping purposes remains a significant component of overall travel demand within urban areas [1, 2].

In recent years, the number of studies on “green purchases” has increased significantly, focusing on the environmental impact of consumer habits [3]. Researchers examine the factors influencing consumers' intention to make environmentally friendly purchases (individual characteristics, cognitive and social factors, product features, and marketing aspects) and assess the potential effects of an increasing share of such purchases [4–6]. “Green purchases” are part of the broader concept of “green behavior” (GB), which refers to private-sphere habits related to everyday environmentally responsible actions — such as household consumption aimed at reducing waste, saving water and energy, prioritizing products with a lower environmental impact, and using reusable goods [7]. Within this broader context, the choice of travel mode is an integral part of GB [8]. If “green purchasing” practices are carried out using a private car, the environmental benefits of such actions are largely offset. Therefore, the choice of transportation mode constitutes an essential component of green behavior overall and is a factor that directly influences the real contribution of “green purchases” to reducing environmental impact.

To effectively respond to new mobility trends and develop a comprehensive planning approach that promotes “soft” modes of transport while preventing undesirable consequences, public authorities need access to information not only on urban freight transport and logistics but also on individual travel patterns and consumer behavior [9]. To design a system of measures that fosters an environmentally sustainable transport system, it is essential to understand which individual and contextual variables influence people's choice of travel mode [10]. Compared to commuting trips, shopping-related trips are more flexible in terms of destination and timing. Therefore, measures that encourage the use of more environmentally friendly transport modes for shopping trips may prove to be more effective [11].

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND FORMULATION OF THE PROBLEM

Recent studies in the field of last-mile logistics have expanded the scope of urban freight transport to include, in addition to actual last-mile delivery, shopping trips made by private cars [12]. Ensuring sustainability in last-mile distribution is a complex challenge due to the growing volume of deliveries combined with strict time requirements [13]. Therefore, a promising direction may be the development of measures aimed at encouraging consumers to switch to more environmentally friendly modes of transport.

Factors influencing users' choice of travel mode in a transport system can be divided into three groups: socio-demographic characteristics, built environment (building density, land-use mix, distance to various facilities, etc.), and attitudes (comfort, convenience, travel satisfaction) [10]. While the scientific literature contains a substantial number of studies on these factors, there are relatively few publications focusing specifically on shopping-related trips. In recent years, researchers have primarily concentrated on examining changes in consumer purchasing behavior associated with the Covid-19 pandemic and/or the growing share of online shopping [1, 14, 15]. However, most studies focus on trips in general or commuting trips [10].

According to the study presented in [16], as population density and the density of shopping locations decrease, the frequency of shopping trips made by car increases.

In [17], based on the analysis of survey results conducted in Munich, Germany, purchasers were divided into six latent classes according to their shopping behavior (including the frequency of offline and online purchases and the mode of transport used for offline shopping). These studies indicate that the groups most inclined to use a car for shopping trips are employed individuals with high income, those with children and access to a private car, as well as residents of less dense residential areas.

In [18], consumer shopping behavior was analyzed based on survey data from Japanese respondents. According to the published results, the choice of travel mode for shopping trips is influenced by employment status (working respondents typically choose the car, while non-working respondents prefer cycling or walking), the distance to the shopping location, and the duration of stay at the destination (those who walked spent the least time shopping, while those who arrived by car spent the most).

According to the studies presented in [19], the frequency of shopping trips made by car is influenced more by habit than by socio-demographic characteristics (the research was based on survey data collected in Sweden). The authors recommend that when developing measures aimed at changing urban travel behavior, special attention should be given to alternatives that prevent and/or reduce the formation of strong habitual patterns.

RESEARCH QUESTIONS

Based on the literature review, the following research questions are formulated:

- RQ1. What factors influence consumer purchasing behavior, and what typical groups of shoppers can be identified?
- RQ2. How can sustainable urban transport policies be adapted to meet the needs of specific groups of shoppers?

RESEARCH RESULT

Data collection procedure and general characteristics of the survey results

To collect data, an online survey of the population was conducted (the questionnaire was created in Google Forms and distributed via social media). A total of 491 completed questionnaires were collected, of which 479 were retained for further analysis after excluding those containing incomplete or evidently false information. The data gathered through the survey can be divided into the following blocks: socio-demographic and socio-economic characteristics of the respondents; general behavior during the purchase of food and non-food products (frequency, place of purchase, typical mode of transport for shopping trips); and information regarding the most recent offline purchase (time, place, amount spent, and mode of transport).

The sample consisted of 63% women. The survey mainly involved young people, with 83% of respondents under the age of 40. The distribution of the sample by average monthly household income was as follows: up to UAH 14,000 — 29%, UAH 14,000–20,000 — 16%, UAH 20,000–30,000 — 16%, UAH 30,000–40,000 — 13%, and over UAH 40,000 — 26%. Employed individuals accounted for 45% of respondents, students for 46%, and the remaining respondents were unemployed (6%) or retired (3%). Among the respondents, 53% (253 individuals) had lived in a large city (population over 300,000) for at least the past six months, 30% (142 individuals) in a city with a population under 300,000, and 17% (83 individuals) in a rural area.

Place of residence affects the frequency of both food and non-food purchases, although the difference is more pronounced for non-food items (Fig. 1).

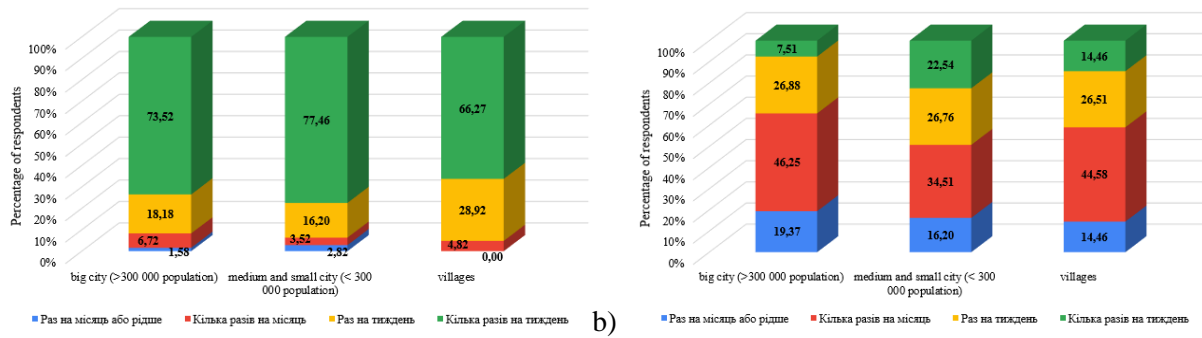


Fig. 1. Distribution of purchases by frequency: a) food products; b) non-food products

Most respondents, regardless of their place of residence, purchase food products several times a week. For rural residents, this figure is slightly lower, with a larger share of purchases occurring once a week. Less than 9% of respondents buy food products less frequently than weekly. For non-food purchases, the differences are more pronounced. The share of respondents making such purchases once a week is almost the same across different residential locations, with only a small variation in the proportion of those purchasing non-food items no more than once a month (15–20%). However, several times a week, 7.5% of residents of large cities make non-food purchases, compared to 22.5% of residents of smaller cities.

Small-volume purchases prevail: 47% of respondents indicated that their most recent purchase weighed less than 2 kg, while 39% reported a weight between 2 and 5 kg. Moreover, 83% of respondents stated that a purchase of this size is typical for them.

The distribution of responses regarding the choice of transport mode for shopping trips is shown in Fig. 2.

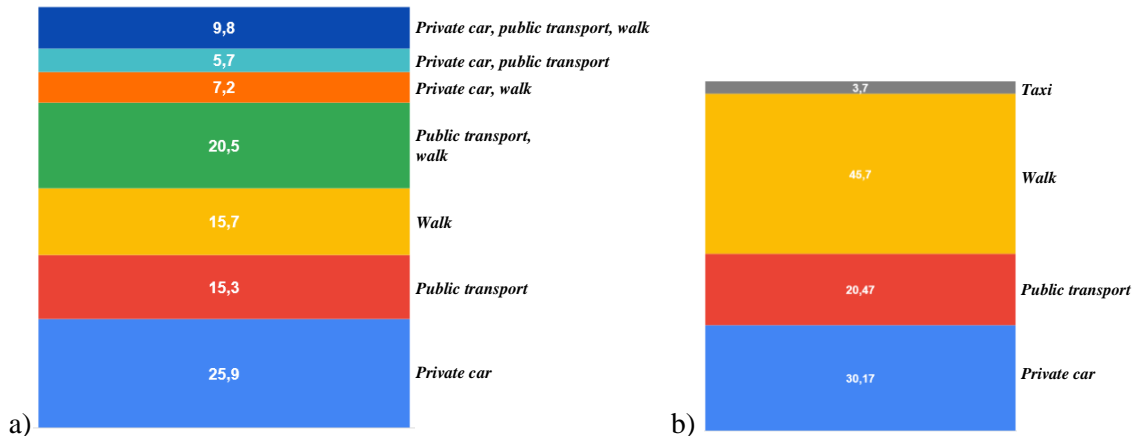


Fig. 2. Mode choice for shopping trips: a) usually; b) during the most recent purchase

Approximately 26% of respondents usually choose a car for shopping trips, while around 23% indicated it as one of the alternatives they use regularly. For public transport, these figures are 15% and 36%, respectively. Overall, transport-based trips account for 41% of all shopping trips, with an additional 43% regularly combining them with walking. Fifty-one percent of respondents reported using some form of transport during their most recent purchase.

Clustering procedure

Among the methods for assessing travel behavior in urban areas, regression models and machine learning techniques are the most popular [10, 20]. Cluster analysis, as one of the machine learning algorithms, is an effective method for dividing datasets into subgroups characterized by distinct differences. Conducting cluster analysis involves the following main steps [21]:

- normalization and standardization of input data;
- dimensionality reduction (excluding data from the sample that do not influence the clustering results);
- cluster identification (based on distance to a cluster centroid, dissimilarity and linkage between groups of observations or density);
- evaluation of results (assessing the reliability of clustering for a given number of clusters).

If the input dataset contains different types of data (numerical, categorical, binary, and multiple-choice), they need to be represented using a common standard. Several methods can be used for encoding:

- One-Hot Encoding is applied to features with a single choice among multiple categories (e.g., gender, time of purchase). This approach helps avoid false assumptions about the order or equidistance between categories, which is particularly important for models sensitive to numerical values (such as decision trees or logistic regression).
- Multi-Hot Encoding is applied to fields where respondents could select multiple options simultaneously (e.g., modes of transport to the shopping location). Each category is transformed into a separate binary variable indicating the presence or absence of the corresponding feature.
- Ordinal Encoding is used for ordered variables, such as income level or purchase weight. Preserving the order allows the model to account for monotonic relationships, which is appropriate when the values have a logical progression (e.g., «less than 2 kg» < «2–5 kg» < 5–10 kg»).

As a result of the preprocessing, a complete set of features suitable for use in clustering and classification algorithms was created. Each row in the table represents an individual respondent, and each column corresponds to a standardized, encoded feature.

Clustering of respondents based on the mode of transport they most frequently use for shopping trips

The study employed hierarchical clustering with dendrogram construction using Ward’s method. The proximity matrix was calculated using the normalized Manhattan distance metric. The clustering process workflow in Orange software is shown in Fig. 3. To determine the importance of variables in the clustering procedure, the Rank function was first applied to the target variable, “mode of transport for shopping trips,” and the variables that most influenced the choice of transport mode were selected.

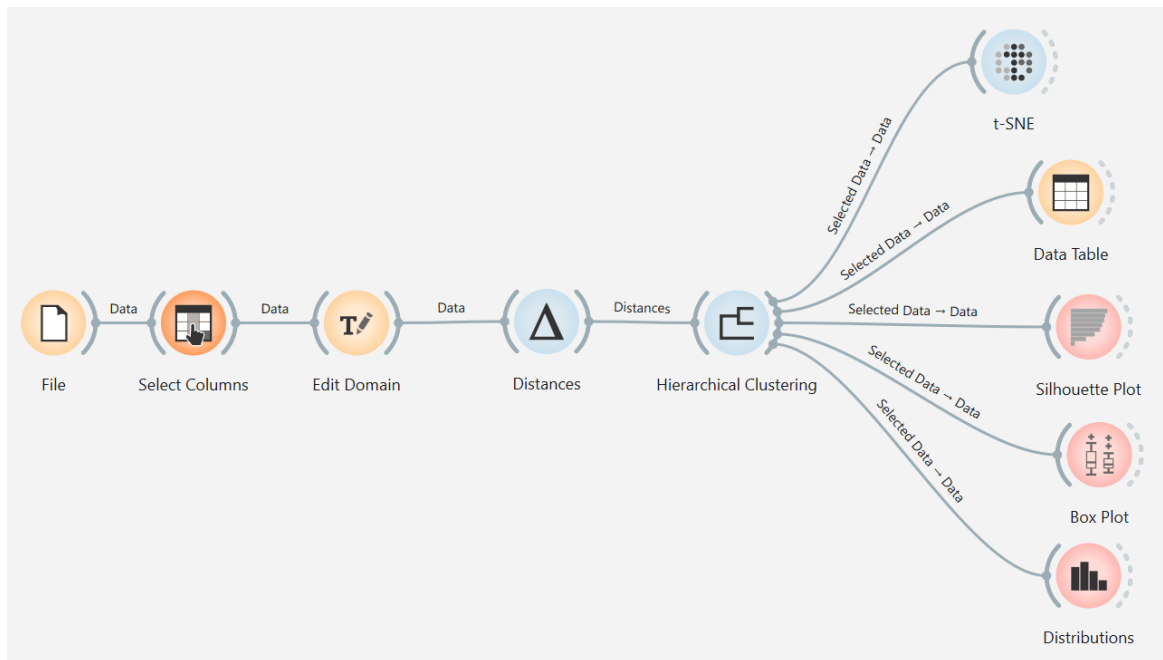


Fig. 3. Hierarchical clustering procedure using Orange software

First, six factors were selected using the Rank function:

- age;
- gender;
- type of employment;
- household size;
- time of the trip;
- purchase weight.

The optimal number of clusters was determined based on the silhouette score values (Table 1).

Table 1. Selection of the optimal number of clusters

Total number of clusters	Weighted average silhouette score	Silhouette score values for each cluster				
		C1	C2	C3	C4	C5
5	0.24	0.564	0.413	0.084	0.199	0.119

4	0.40	0.564	0.413	0.133	0.455	–
3	0.38	0.382	0.142	0.455	–	–
2	0.63	0.498	0.702	–	–	–

The silhouette score reflects the level of cohesion within a cluster. Its values range from -1 to +1, with values closer to 1 indicating that an object fits well within its cluster [22]. For the selected set of factors, the best results were obtained by dividing the sample into two clusters.

Members of the first cluster primarily make shopping trips by private car (48%) or on foot (33.7%). This group consists mainly of middle-aged working individuals, predominantly women. The second cluster mainly comprises students who prefer using a private car (41%) or public transport (32.4%) for their trips. A more detailed characterization of the resulting clusters is presented in Table 2.

Table 2. Clustering parameters and factors considered in the cluster division

Variable	Value type	Mean value and dispersion (for a numerical variable)	Percentage distribution (for a categorical variable)	Estimate
Cluster C1				
Age	Numeric	44,75±10,1		Student's t = 22,19 p=0,000
Household size	Numeric	3,48±1,2		Student's t = 1,51 p=0,133
Gender	Categorical		84,3% – female	$\chi^2 = 27,05$ p=0,000
Type of employment	Categorical		83,15% – employed population	$\chi^2 = 117,69$ p=0,000
Time of the trip	Categorical		21,35% – 9:00 – 12:00 30,34% – 12:00 – 15:00 22,3% – 15:00 – 18:00 22,5% – after 18:00	$\chi^2 = 11,08$ p=0,050
Purchase weight	Categorical		17,3% – purchases weighing up to 2 kg 56,8% – purchases weighing 2–5 kg 17,3% – purchases weighing 5–10 kg	$\chi^2 = 28,67$ p=0,000
Cluster C2				
Age	Numeric	20,2±3,8		Student's t = 22,19 p=0,000
Household size	Numeric	3,24±1,3		Student's t = 1,51 p=0,133
Gender	Categorical		50% – female	$\chi^2 = 27,05$ p=0,000
Type of employment	Categorical		69,3% – students	$\chi^2 = 117,69$ p=0,000
Time of the trip	Categorical		14,77% – 9:00 – 12:00 22,7% – 12:00 – 15:00 37,5% – 15:00 – 18:00 23,3% – after 18:00	$\chi^2 = 11,08$ p=0,050
Purchase weight	Categorical		53,9% – purchases weighing up to 2 kg 34,2% – purchases weighing 2–5 kg 9,4% – purchases weighing 5–10 kg	$\chi^2 = 28,67$ p=0,000

The p-value for the variable “household size” is greater than the critical value of 0.05; therefore, the clustering was performed without taking this factor into account. The calculations presented in Table 3 confirm the appropriateness of this step, as the weighted average silhouette score increases.

Table 3. Selection of the optimal number of clusters

Total number of clusters	Weighted average silhouette score	Silhouette score values for each cluster				
		C1	C2	C3	C4	C5
5	0,27	0,657	0,423	0,100	0,318	0,112
4	0,44	0,657	0,423	0,162	0,526	–
3	0,42	0,393	0,170	0,526	–	–
2	0,67	0,522	0,739	–	–	–

Members of the first cluster mainly make medium-weight purchases (2–5 kg), with more than half of the trips occurring before 3:00 p.m. (55%). In the second cluster, purchases weighing up to 2 kg prevail (54%), and shopping trips are shifted toward the afternoon hours (after 3:00 p.m.) – 61% of purchases.

Separate graphical dependencies were constructed between the time of purchase and choice of transport mode, as well as between purchase weight and choice of transport mode (Fig. 4 and Fig. 5).

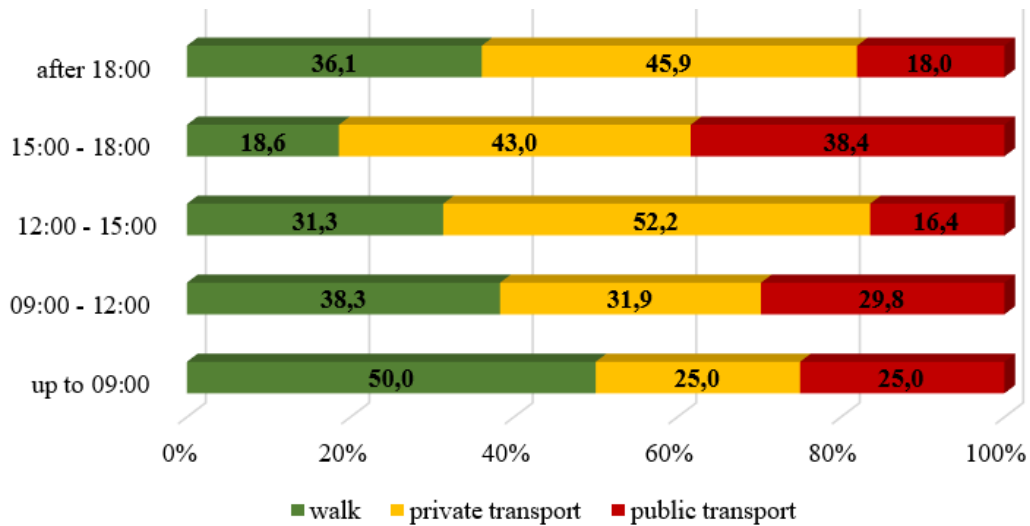


Fig. 4. The impact of purchase time on the mode choice



Fig. 5. The impact of purchase weight on the mode choice

The highest share of walking trips occurs during morning shopping (50% for purchases before 9:00 a.m. and 38% for purchases between 9:00 a.m. and 12:00 p.m.). After 12:00 p.m., the overall use of transport, particularly private vehicles, increases. Public transport is most actively used during the afternoon hours, with over 38% of respondents utilizing it for shopping trips between 3:00 p.m. and 6:00 p.m.

The relationship between the choice of transport mode and purchase weight is even more pronounced. For the smallest weight category (< 2 kg), walking is the predominant mode of transportation (48%). As purchase weight increases, the use of transport also rises: for medium-weight purchases, the share of walking slightly decreases in favor of public transport, while for purchases over 5 kg, the share of trips made by private car sharply increases, reaching nearly 100% for purchases weighing more than 10 kg. This is supported by other studies, which indicate that a larger shopping list or visiting multiple stores in a single shopping trip significantly increases the likelihood of using a private car [23].

DISCUSSION OF THE RESULTS OF THE STUDY AND SUMMARY

The conducted study made it possible to identify the key socio-demographic and behavioral factors that determine consumers' choice of transport mode for shopping trips. The application of cluster analysis allowed the identification of two groups of respondents differing in age, gender, occupation, as well as the weight and timing of their purchases.

Middle-aged respondents, predominantly women with active employment, prefer to use private cars or walk for shopping trips. Their purchases are typically of medium weight and occur throughout the day, with slightly higher activity between 12:00 and 3:00 p.m., possibly during lunch breaks at work. A separate cluster of younger respondents, primarily students, more often combines car trips with public transport. Their purchases tend to be lighter, and shopping trips are shifted toward the afternoon (after 3:00 p.m.). Some studies indicate that younger people are more inclined to use environmentally friendly transport modes, partly due to their mobility and fewer established travel habits [24]. The present study partially confirms this, as the combined share of public transport and walking trips is higher in the second cluster (69% versus 61% for the first cluster). These findings provide a foundation for more targeted sustainable urban transport policies, particularly aimed at younger population groups, who are more open to changing travel behaviors. For students, it is advisable to focus on improving access to public transportation and micro-mobility infrastructure. For the employed population, incentives to reduce private car use—such as developing ride-sharing systems, enhancing walking conditions, and integrating mobility services—are particularly important.

A prospect for further research is the assessment and modeling of the impact of shopping-related travel flows on overall traffic. Considering that shopping trips using transport are most frequent between 3:00 p.m. and 6:00 p.m. (including the start of the evening peak), studying these micro-mobility flows is a highly relevant issue.

REFERENCES

1. Le, H. T., Carrel, A. L., & Shah, H. (2022). Impacts of online shopping on travel demand: a systematic review. *Transport Reviews*, 42(3), 273-295. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1961917>
2. Zhuk, M., Pivtorak, H., Markevych, A. (2024). The impact of socio-demographic indicators on urban shopping trip parameters. *Advances in mechanical engineering and transport*, 2(23), 27-34. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1522>
3. Sharma, K., Aswal, C., & Paul, J. (2023). Factors affecting green purchase behavior: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 2078-2092. <https://doi.org/10.1002/bse.3237>
4. Zhuang, W., Luo, X., & Riaz, M. U. (2021). On the factors influencing green purchase intention: A meta-analysis approach. *Frontiers in psychology*, 12, 644020. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.644020>
5. Zhang, X., & Dong, F. (2020). Why do consumers make green purchase decisions? Insights from a systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 17(18), 6607. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186607>
6. Patiño-Toro, O. N., Valencia-Arias, A., Palacios-Moya, L., Uribe-Bedoya, H., Valencia, J., Londoño, W., & Gallegos, A. (2024). Green purchase intention factors: A systematic review and research agenda. *Sustainable Environment*, 10(1), 2356392. <https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2356392>
7. Ogiemwonyi, O. (2024). Determinants of green behavior: A comparative study. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 22, 200214. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200214>
8. Khan, A. N. (2024). Elucidating the effects of environmental consciousness and environmental attitude on green travel behavior: Moderating role of green self-efficacy. *Sustainable Development*, 32(3), 2223-2232. <https://doi.org/10.1002/sd.2771>
9. Bjørgen, A., Bjerkan, K. Y., & Hjelkrem, O. A. (2021). E-groceries: Sustainable last mile distribution in city planning. *Research in Transportation Economics*, 87, 100805. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100805>

- 10.Cheng, L., Chen, X., De Vos, J., Lai, X., & Witlox, F. (2019). Applying a random forest method approach to model travel mode choice behavior. *Travel behaviour and society*, 14, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2018.09.002>
- 11.Liu, J., Wang, B., & Xiao, L. (2021). Non-linear associations between built environment and active travel for working and shopping: An extreme gradient boosting approach. *Journal of Transport Geography*, 92, 103034. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103034>
- 12.Bjørgen, A., & Ryghaug, M. (2022). Integration of urban freight transport in city planning: Lesson learned. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103310. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103310>
- 13.Bjørgen, A., Seter, H., Kristensen, T., & Pitera, K. (2019). The potential for coordinated logistics planning at the local level: A Norwegian in-depth study of public and private stakeholders. *Journal of Transport Geography*, 76, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.02.010>
- 14.Anwari, N., Ahmed, M. T., Islam, M. R., Hadiuzzaman, M., & Amin, S. (2021). Exploring the travel behavior changes caused by the COVID-19 crisis: A case study for a developing country. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100334>
- 15.Ozbilen, B., Wang, K., & Akar, G. (2021). Revisiting the impacts of virtual mobility on travel behavior: An exploration of daily travel time expenditures. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145, 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.002>
- 16.Niklas, U., von Behren, S., Soyulu, T., Kopp, J., Chlond, B., & Vortisch, P. (2020). Spatial factor—Using a random Forest classification model to measure an internationally comparable urbanity index. *Urban Science*, 4(3), 36. <https://doi.org/10.3390/urbansci4030036>
- 17.Bönisch, L., von Behren, S., Chlond, B., & Vortisch, P. (2021). Insights into shopping travel behavior: latent classes in relation to attitudes towards shopping. *European transport research review*, 13(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00492-4>
- 18.Yamada, T., & Hayashida, T. (2020). Analysis of shopping behavior characteristics in the Keihanshin metropolitan area in Japan based on a person trip survey. *Geo-Spatial Information Science*, 23(4), 305-315. <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1845984>
- 19.Ramos, É. M. S., Bergstad, C. J., & Nässén, J. (2020). Understanding daily car use: Driving habits, motives, attitudes, and norms across trip purposes. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 68, 306-315. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.11.013>
- 20.Golshani, N., Shabanpour, R., Mahmoudifard, S. M., Derrible, S., & Mohammadian, A. (2018). Modeling travel mode and timing decisions: Comparison of artificial neural networks and copula-based joint model. *Travel Behaviour and Society*, 10, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2017.09.003>
- 21.Dalmaijer, E.S., Nord, C.L. & Astle, D.E. Statistical power for cluster analysis. *BMC Bioinformatics* 23, 205 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04675-1>
- 22.Todeschini, R., Ballabio, D., Termopoli, V., & Consonni, V. (2024). Extended multivariate comparison of 68 cluster validity indices. A review. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 251, 105117. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105117>
- 23.Mattioli, G., Anable, J., & Vrotsou, K. (2016). Car dependent practices: Findings from a sequence pattern mining study of UK time use data. *Transportation research part A: Policy and practice*, 89, 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.04.010>
- 24.De Vos, J., & Alemi, F. (2020). Are young adults car-loving urbanites? Comparing young and older adults' residential location choice, travel behavior and attitudes. *Transportation research part A: Policy and Practice*, 132, 986-998. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.004>

Півторак Г.В., Пруський Є.В. Використання кластерного аналізу для вивчення характеристик мікровантажних потоків покупців

У статті представлено результати дослідження, спрямованого на виявлення соціально-демографічних і поведінкових чинників, що впливають на вибір способу пересування населення під час здійснення покупок. Зважаючи на зростання обсягів поїздок, пов'язаних із закупівлею товарів, і на посилення уваги до екологічних аспектів міської мобільності, у роботі розглянуто феномен мікровантажних потоків покупців як частину ширшої системи міських вантажних перевезень.

Дослідження базується на результатах онлайн-опитування 479 респондентів. На основі методу ієрархічної кластеризації визначено два основні кластери покупців. Перший кластер сформуливали представники середнього віку, переважно жінки, які поєднують активну зайнятість із виконанням покупок середньої ваги (2–5 кг), здебільшого у денний час, і віддають перевагу пересуванню

приватним автомобілем або пішки. Другий кластер охоплює переважно студентську молодь, яка здійснює невеликі покупки (до 2 кг), частіше після 15:00, комбінуючи громадський транспорт і піші переміщення.

Отримані результати підтверджують наявність статистично значущих відмінностей між групами за віком, статтю, видом діяльності, часом виконання та вагою покупки. Виявлено чітку залежність між вагою покупки та вибором транспортного засобу: зі зростанням ваги суттєво підвищується ймовірність використання приватного автомобіля. Аналогічно, часові характеристики впливають на модальний вибір – у ранкові години переважають піші переміщення, тоді як у пообідній період зростає частка автомобільних поїздок та поїздок громадським транспортом.

Практичне значення роботи полягає у формуванні наукового підґрунтя для розроблення цільових заходів сталого транспортного планування, зорієнтованих на конкретні групи користувачів. Для молоді доцільно зосередитися на покращенні доступності громадського транспорту та розвитку інфраструктури мікромобільності, тоді як для працюючого населення ефективними можуть бути стимули до скорочення використання приватного автомобіля.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з моделюванням впливу покупецьких мікровантажних потоків на загальні транспортні потоки міста. Такий аналіз є важливим для управління піковими навантаженнями транспортної системи та розроблення політик екологічно сталого розвитку міських перевезень.

Ключові слова: переміщення з метою покупки, кластерний аналіз, соціально-демографічні показники, вибір виду переміщення, мікровантажні потоки

ПІВТОРАК Галина Василівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій НУ «Львівська політехніка». E-mail: halyna.v.pivtorak@lpnu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3645-1586>

ПРУСЬКИЙ Євген Володимирович, аспірант кафедри транспортних технологій НУ «Львівська політехніка». E-mail: yevhen.v.pruskyi@lpnu.ua

Halyna PIVTORAK, candidate of technical science, Associate Professor, department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University. E-mail: halyna.v.pivtorak@lpnu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3645-1586>

Yevhen PRUSKYI, PhD student, department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University. E-mail: yevhen.v.pruskyi@lpnu.ua <https://orcid.org/0009-0005-2364-3441>

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1911

Ptytsia Natalia
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

MODELING OF ADDITIONAL TIME COSTS IN THE ROAD TRANSPORT SYSTEM AT THE LAST MILE STAGE

The article addresses the problem of optimizing loading and unloading operations in road transport as a key element of the transport and logistics process that significantly affects the overall efficiency of freight delivery. It has been established that considerable time expenditures during the execution and waiting for loading and unloading operations lead to increased operating costs and reduced fleet productivity. An analysis of the regulatory framework showed that the existing regulations were developed under the conditions of a centralized economy and do not correspond to modern market requirements.

The necessity of updating these standards has been substantiated, taking into account contemporary conditions and the characteristics of vehicles, types of packaging, as well as the specifics of goods and organizational approaches to logistics operations. The use of regression models has been proposed to formalize the dependencies between the duration of loading and unloading operations and the key parameters of the process. The obtained values of time parameters can be incorporated into the construction of linear and regression models, which will ensure greater accuracy in predicting time expenditures and in developing recommendations for improving the efficiency of transport and logistics systems. The integration of regulatory, mathematical, and digital approaches to the optimization of loading and unloading operations in last-mile retail logistics is identified as a necessary condition for enhancing the effectiveness of logistics processes under current market conditions.

Keywords: loading and unloading operations, road transport, logistics processes, transportation efficiency, regression modeling, time expenditures, last mile.

INTRODUCTION

Loading and unloading operations in road transport represent one of the most resource-intensive and critically important components of the transportation process, significantly affecting its overall efficiency. Considerable time expenditures for performing or waiting for loading and unloading operations lead to prolonged vehicle downtime, which results in higher operating costs and reduced turnover of the rolling stock.

The main causes of such time losses include: insufficient mechanization of operations, outdated technical equipment, lack of unified logistical coordination among participants in the transport process at transshipment points, as well as inefficient organization of preparatory and accompanying operations [1, 2].

Within the framework of the modern logistics approach, optimization of loading and unloading operations involves a comprehensive review and streamlining of operations at points of cargo dispatch and receipt, particularly at warehouses, logistics terminals, and consolidation centers.

The foundation for improving efficiency lies in ensuring the prior readiness of cargo for shipment: formation of consignments taking into account the technical parameters of vehicles (load capacity, dimensional restrictions), packaging of cargo into transport containers, precise identification of cargo location within storage zones, as well as timely preparation of mechanization equipment (forklifts, conveyors, cranes, etc.) for operation. The packaging of small-batch and piece cargoes has become particularly relevant, as it minimizes the number of operations and reduces the impact of the human factor [2, 3].

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The regulation of vehicle downtime during loading and unloading operations is governed by normative documents, in particular the «Unified Time Standards», which establish baseline values for first-class cargo per ton. For second-, third-, and fourth-class cargoes, adjustment coefficients are applied that account for the actual coefficient of vehicle load capacity utilization, taking into consideration full loading within permissible dimensions (including volumetric limitations) [3–5].

Modern research confirms the significant variability in the actual duration of loading and unloading operations, which is determined by cargo characteristics, vehicle parameters, the level of mechanization, and personnel qualifications. To refine these dependencies, the use of regression models is proposed, as they make it possible to formalize the relationship between processing time and key process parameters [5–9]. For example, calculations have shown that additional time expenditures for documentation amount to approximately 0.24 hours, while the standard time for loading and unloading operations per ton of cargo is 0.07 hours, which confirms the necessity of accounting for these factors in practical planning.

In a broader context, the literature review [3–9] indicates that the problem of optimizing vehicle servicing at cargo handling points extends far beyond the purely technical aspects of loading and unloading operations. It encompasses:

- optimization of vehicle service sequencing as a task of minimizing total costs;
- implementation of information technologies to enhance the efficiency of logistics systems;
- strategic planning of logistics processes and rational use of resources;
- application of mathematical models — from the classical vehicle routing problem (VRP, PVRP) to modern methods of fuzzy logic and queuing theory;
- digitalization and automation using blockchain, cloud services, and artificial intelligence.

Particular importance is attached to the integration of these approaches into practical solutions that focus not only on minimizing downtime but also on incorporating loading and unloading operations into the overall management of transport and warehouse flows.

Thus, loading and unloading operations optimization serves as a fundamental element in improving vehicle service systems at logistics terminals and provides a foundation for the development of more advanced digital and mathematical management models.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The purpose of this article is to substantiate the necessity of considering additional time expenditures for loading and unloading operations and documentation processing in the organization of road transportation of small consignments.

The objective of the study is to develop an approach to formalizing these factors within a mathematical model, which enhances the accuracy of logistics cost assessment and supports effective managerial decision-making.

RESEARCH RESULTS

However, the existing regulations were developed under conditions of centralized economic management and were primarily oriented toward typical processes, which no longer fully correspond to the realities of modern market-oriented logistics.

In connection with the transition to a decentralized economic management system, the increasing role of private carriers, and the implementation of flexible logistics strategies, there arises a need to update and adapt the regulatory and methodological framework.

Modern logistics planning requires a revision of the regulations regarding the duration of individual stages of loading and unloading operations, taking into account changes in vehicle characteristics (body types, level of automation, platform parameters), new types of containers and packaging, as well as the specific features of the cargo being handled.

The time for loading and unloading is determined either by regulatory standards or by the dependency (1), which has the following form:

$$t_{\text{н/п}} = 2 \cdot (t_{\text{д}} + q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot \tau_{\text{н-п}}), \quad (1)$$

where $t_{\text{д}}$ – additional time for documentation processing, h;

$q_{\text{н}}$ – nominal vehicle load capacity, t;

$\tau_{\text{н-п}}$ – standard time for loading or unloading 1 ton of cargo, h/t;

$\gamma_{\text{ст}}$ – coefficient of static load capacity utilization.

According to current regulations, the average duration of procedures related to the documentation of cargo operations is 15–20 minutes [1–3]. The normative time expenditures for performing loading and unloading operations per ton of cargo generally amount to about 3 minutes. However, the results of modern empirical studies demonstrate significant variability in these indicators depending on the specific conditions of logistics operations. This variability is determined by a number of factors, in particular: the physical and mechanical properties of the cargo (volume, weight, shape, fragility), the type of transport used, the level of mechanization, the organizational structure of the logistics operation, and the qualifications of the personnel.

Considering the substantial dispersion of actual loading and unloading operations duration values, there is an objective need for an in-depth analysis of the functional dependencies between time expenditures and the parameters that determine them. Such an approach makes it possible not only to adapt existing regulations to modern conditions but also to develop recommendations aimed at improving the efficiency of logistics operations through rational planning of resources and time.

This issue becomes particularly relevant in the context of organizing the “last mile” stage in retail logistics systems [5]. The delivery of small-batch cargoes to the end consumer is generally carried out by light and medium-duty vehicles, which results in higher frequency of loading and unloading operations while reducing the volume of individual shipments.

At the same time, even when using the same method of performing cargo operations (for example, with a manual hydraulic trolley), the level of efficiency largely depends on such factors as the infrastructural characteristics of the delivery point (availability of ramps, elevators, access roads), time of day, road traffic density, and the workload of logistics personnel.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

To refine the recommended data, it is necessary to study the functional dependencies of the corresponding performance indicators on various factors. The specific feature of the last mile stage in retail logistics systems is that the delivery of small-batch cargo is carried out by vehicles of different load capacities, while the same method and organization of loading and unloading operations are applied. These dependencies are predominantly linear in nature [10], therefore, the time expenditures for their execution can be represented by the corresponding linear model:

$$Y = a_x + b_x x, \quad (2)$$

where $Y = t_{h-p}$ – time for loading and unloading cargo, h;

$Y = t_{h-p}$ – additional time for documentation processing, h;

$b_x = 2\tau_{h-p}$ – standard time for loading or unloading 1 ton of cargo, h/t;

$x = q_H \cdot \gamma_{cr}$ – product of the nominal vehicle load capacity and the coefficient of static load utilization, t.

For conducting calculations and approximating the dependence of loading and unloading operations duration on its components, regression analysis is applied. To obtain the coefficient values, field observation data on the time vehicles spend at loading and unloading points during cargo delivery by vehicles of different load capacities are used [5, 10].

The coefficients of the regression models obtained in the course of calculations, as well as the verification of their statistical significance, are presented in Table 1.

Table 1 – Calculation results and verification of regression model coefficients

Indicator	Value	Standard error	t- criterion for coefficients of regression equations	p – null hypothesis probability values for regression equation coefficients
$a_x = 2t_d$	0,483289	0,0228	21,1181	$2,23 \cdot 10^{-9}$
$b_x = 2\tau_{h-p}$	0,13466	0,0232	15,789	$2,19 \cdot 10^{-10}$

The correlation coefficient for calculating the duration of loading and unloading operations is 0,91, the standard approximation error amounts to 0,6. The adjusted multiple correlation coefficient is 0,87 and the probability value of the null hypothesis (F-test) equals 0.000001.

As a result of the performed calculations, it was established that the additional time expenditures associated with the preparation of accompanying documentation amount $t_0 = 0.24$ h, while the duration of loading and unloading operations for 1 ton of cargo is $\tau_{h-p} = 0.07$ h.

CONCLUSIONS

The obtained quantitative values should be taken into account when formalizing the mathematical model that describes the structure and dynamics of logistics costs associated with small-batch cargo delivery at the final stage of the logistics chain. Their inclusion in the model makes it possible to adequately account for time expenditures accompanying logistics servicing, particularly vehicle downtimes caused by administrative and technological procedures.

This, in turn, ensures greater accuracy in forecasting total costs and supports the adoption of well-founded managerial decisions in route planning and resource provision for logistics operations.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Єдині тарифи на перевозку вантажів. Прейскурант №13-01-02. Держкомцін УССР. Київ: 1989. 60 с.
2. Заборський Л.О. Методичні основи організації транспортно-технологічних процесів у системах доставки вантажів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Одеськ. нац. морськ. ун-т: Одеса, 2008. 20 с.
3. Горяїнов О.М. Особливості виконання навантажувально-розвантажувальних робіт на об'єктах транспорту з позиції транспортної. Збірник наукових праць. Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. Луганськ. 2013. С. 39-41.
4. Калініченко О.П., Россолов О.В. Організація перевезень вантажів: Навчальний посібник. Харків : ХНАДУ, 2005. 123 с.
5. K. Kovtsur, N. Ptytsia, Ye. Liubyi, V. Fedorov An approach to determine vehicle idle time at unloading points. AIP Conference Pro-ceedings 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.
6. Fedorov V. Yu., Voronova E. M., Kovtsur K. H. Study of the def-inition of vehicle downtime at thepoint of loading and unloading. Pro-ceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 266-271.
7. Федоров В., Ковцур К., Птиця Н. Взаємодія видів транспорту: особливості обслуговування транспортних засобів в пунктах переробки вантажів. Розвиток транспорту, 2023. 4(15). С. 123-130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>.
8. Ковцур К.Г., Федоров В.Ю. Оцінка часу обслуговування транспортних засобів у пункті переробки вантажів. Матеріали XVII Міжнародної конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Варна, Болгарія, 05–08 червня 2023 р.). Варна: ТУ Варна. 2023. С. 349-353.
9. Boysen N, Fliedner M, Scholl A (2010) Scheduling in boundandout bound trucks at crossdocking terminals (OR Spect 32) pp 135–161
10. Лашчених О.А., Кузькін О.Ф., Грицай С. В. Імовірнісні і статистико-експериментальні методи аналізу транспортних систем: навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. 420 с.

REFERENCES

1. Yedyni taryfy na perevozku vantazhiv. (1989). Preiskurant №13-01-02. Derzhkomtsin USSR. Kyev. 60 s.
2. Zaborskyi L.O. Metodychni osnovy orhanizatsii transportno-tekhnologichnykh protsesiv u systemakh dostavky vantazhiv: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.01 / Odesk. nats. morsk. un-t: Odesa, 2008. 20 s.
3. Horiainov O.M. (2013). Osoblyvosti vykonannia navantazhuvalno-rozvantazhuvalnykh robit na obiektakh transportu z pozytsii transportnoi. Zbirnyk naukovykh prats. Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet im. V. Dalia. Luhansk. S. 39-41.
4. Kalinichenko O.P., Rossolov O.V. (2005). Orhanizatsiia perevezen vantazhiv: Navchalnyi posibnyk. Kharkiv : KhNADU. 123 s.
5. K. Kovtsur, N. Ptytsia, Ye. Liubyi, V. Fedorov An approach to determine vehicle idle time at unloading points. AIP Conference Pro-ceedings 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.
6. Fedorov V. Yu., Voronova E. M., Kovtsur K. H. (2021). Study of the def-inition of vehicle downtime at thepoint of loading and unloading. Pro-ceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. Pp. 266-271.
7. Fedorov V., Kovtsur K., Ptytsia N. (2023). Vzaiemodiia vydiv transportu: osoblyvosti obsluhovuvannia transportnykh zasobiv v punktakh pererobky vantazhiv. Rozvytok transportu. 4(15). S. 123-130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>.
8. Kovtsur K.H., Fedorov V.Iu. (2023). Otsinka chasu obsluhovuvannia transportnykh zasobiv u punkti pererobky vantazhiv. Materialy XVII Mizhnarodnoi konferentsii «Stratehiia yakosti v promyslovosti i osviti» (Varna, Bolhariia, 05–08 chervnia 2023 r.). Varna: TU Varna. 2023. S. 349-353.
9. Boysen N, Fliedner M, Scholl A (2010) Scheduling in boundandout bound trucks at crossdocking terminals (OR Spect 32) pp 135–161
10. Lashchenykh O.A., Kuzkin O.F., Hrytsai S. V. (2011). Imovirnisni i statystyko-eksperymentalni metody analizu transportnykh system: navchalnyi posibnyk. Zaporizhzhia: ZNTU. 420 s.

Птиця Н.В. Моделювання додаткових витрат часу в системі автомобільних перевезень на етапі last mile

У статті розглянуто проблему оптимізації навантажувально-розвантажувальних робіт на автомобільному транспорті як ключового елементу транспортно-логістичного процесу, що суттєво впливає на загальну ефективність перевезень. Встановлено, що значні часові витрати під час виконання та очікування навантажувально-розвантажувальних робіт зумовлюють підвищення експлуатаційних витрат і зниження продуктивності рухомого складу. Аналіз нормативної бази показав, що чинні регламенти були розроблені за умов централізованої економіки та не відповідають сучасним ринковим умовам. Обґрунтовано необхідність їх оновлення з урахуванням сучасних умов та характеристик транспортних засобів, видів тари і упаковки, а також специфіки вантажів і організаційних підходів до логістичних операцій. Запропоновано використання регресійних моделей для формалізації залежностей між тривалістю навантажувально-розвантажувальних робіт та ключовими параметрами процесу. Отримані значення часових параметрів можуть бути включені у побудову лінійних і регресійних моделей, що забезпечить точність прогнозування витрат часу та формування рекомендацій для підвищення ефективності транспортно-логістичних систем. Інтеграція нормативних, математичних та цифрових підходів до оптимізації навантажувально-розвантажувальних робіт при забезпеченні «last mile» у роздрібній логістиці є необхідною умовою підвищення ефективності логістичних процесів у сучасних умовах.

Ключові слова: вантажно-розвантажувальні операції, автомобільний транспорт, логістичні процеси, ефективність перевезень, регресійне моделювання, часові витрати, остання миля.

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: 16.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1912

Ptytsia N.V., Ptytsia H.Hr.
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BUILDING ADAPTIVE AND SUSTAINABLE SUPPLY CHAINS

The article explores the role of artificial intelligence (AI) in the digital transformation of logistics systems. It highlights the practical benefits of AI integration, including optimization of supply chain management, predictive demand modeling, reduction of operational costs, increased delivery speed, and improved customer service quality. Particular attention is given to the contribution of AI to sustainability by analyzing CO₂ emissions, supporting the use of alternative fuels, optimizing packaging cycles, and providing tools for ESG-oriented strategies. The study also identifies new professional roles emerging within logistics, such as logistics data analysts, AI system architects, digital twin engineers, and specialists in AI ethics in supply chains. At the same time, challenges related to data unification, cybersecurity, standardization of APIs, and compliance with regulations on automated data processing are underlined. From an engineering perspective, successful AI implementation requires compatibility of hardware and software infrastructure, reliable communication channels, and protection against cyberattacks. The article emphasizes that the effectiveness of AI deployment depends not only on technology availability but also on organizational maturity, readiness for change, and data-driven decision-making culture. It is concluded that logistics of the future will evolve into an intelligent ecosystem where human and artificial intelligence complement each other, forming autonomous, adaptive, and sustainable supply chains, thus strengthening global competitiveness and resilience in conditions of uncertainty.

Keywords: artificial intelligence, supply chain management, digital transformation, sustainability, predictive analytics, automation.

INTRODUCTION

Over the past decades, logistics has undergone significant transformation, evolving from a supporting business function into an independent field of knowledge and a technological platform that determines both the competitiveness of companies and the efficiency of global markets. Its technical evolution is characterized by the widespread implementation of cyber-physical systems, digital twins, automation solutions, and integration with information platforms capable of self-learning and autonomous management [1]. In this context, logistics is no longer limited to the coordination of material flows. It has become a complex adaptive network that operates in real time, utilizing big data analytics, predictive algorithms, intelligent information processing systems, and autonomous robotic devices that interact with each other through open communication protocols.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

Modern logistics processes are built upon automated warehouses, autonomous vehicles, transportation management systems (TMS), warehouse management systems (WMS), as well as advanced telemetry, which includes real-time monitoring of transportation conditions, object location, and equipment technical status [2]. From the perspective of engineering system integration, logistics today represents a combination of physical infrastructure, hardware-software complexes, network environments, and control algorithms that function as a unified intellectualized system with elements of decentralized management. Such systems enable enterprises to achieve flexibility, adaptability, and high levels of customer service in an unpredictable environment of global risks. Another important trend in the technological development of logistics is the proliferation of IoT solutions that ensure full digital visibility of the supply chain. According to [1], more than 70 % of logistics companies in Europe and the USA already employ IoT devices to monitor cargo, equipment, and routes. Sensors measuring temperature, humidity, pressure, and spatial positioning are integrated directly with pallets, containers, or cargo platforms, thereby creating a distributed sensor network with the capability of dynamic real-time data acquisition. The collected information is transmitted via 5G or LTE-M networks to cloud computing environments or edge devices, where it is pre-processed prior to further analysis [1, 3, 4]. All the collected information forms the foundation of analytical modules, enabling anomaly detection, failure prediction, route optimization, and minimization of cargo spoilage risks. Large manufacturing and transportation enterprises increasingly adopt digital twins – precise virtual replicas of real objects or processes – which make it possible to model various behavioral scenarios of logistics systems without physical intervention. Major logistics corporations actively apply such digital models for simulating port operations and managing railway logistics at the interregional level. All these components constitute part of a new engineering paradigm in logistics that requires deep automation, interoperability, and adaptive

management [3, 5]. Another significant vector of technological development in the industry has been the introduction of autonomous mobile platforms and robotic systems in warehouses. Solutions based on AMR (Autonomous Mobile Robots) and AGV (Automated Guided Vehicles) are employed in leading logistics hubs, including Amazon, DHL, FedEx, and XPO Logistics [4, 6]. Robots perform automated pallet delivery, barcode scanning, cargo transportation between warehouse zones, and interaction with sorting systems. Collaborative robots (cobots), particularly those operating within hybrid human-machine systems, help reduce the workload on personnel and increase the accuracy of operations. The programming of such robots is carried out through visual learning modules and reinforcement learning algorithms, which make them adaptable to changing environmental configurations.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The purpose of this study is to analyze the role of artificial intelligence in the transformation of logistics systems, to identify the benefits and challenges of its integration, and to outline prospects for building sustainable and adaptive supply chains.

RESEARCH RESULTS

The automation of logistics operations in transportation has also reached a new level. Many countries are conducting pilot projects in autonomous truck management (TuSimple, Einride, and Aurora), integrating computer vision, LIDAR, GPS, deep learning, and real-time environmental modeling [7]. Such solutions enhance the efficiency of long-haul transportation, especially under driver shortages. The development of drones for last-mile delivery, although limited, is gaining traction. In the United States, giants such as Walmart and UPS already carry out regular deliveries of small cargoes to rural areas using AI-enabled navigation drones, reducing operating costs by 30–40% compared to traditional methods.

However, despite the impressive progress of automation, artificial intelligence itself has become the system-forming element of modern technical logistics. Its implementation enables the creation of adaptive, self-organizing, and self-optimizing logistics networks capable of responding to changes in real time without human intervention. Machine learning algorithms, neural networks, deep learning, fuzzy logic, and heuristic methods have become fundamental tools for analysis and decision-making in environments characterized by a high number of variables. Demand forecasting systems based on LSTM and XGBoost achieve high accuracy even under unstable markets and seasonal fluctuations, which is critically important for distribution centers. Further integration of artificial intelligence in logistics is being implemented through intelligent route management systems, which account for numerous real-time variables—including traffic conditions, weather, technical specifications of vehicles, customer service time windows, and delivery constraints. Dijkstra's algorithms, genetic algorithms, Q-learning, as well as deep neural networks can generate optimal routes that simultaneously minimize costs and prioritize service requirements [8]. Such systems are already in use by global operators: UPS applies its ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation) platform, which, according to reports, saves the company over 100 million miles of travel annually and reduces fuel consumption by 10 million gallons. Amazon, FedEx, and DHL are actively testing solutions for autonomous route selection, combining GPS monitoring with predictive analytics and machine learning systems for environmental recognition.

Artificial intelligence is also widely applied in inventory management, particularly in demand forecasting, service level evaluation, safety stock management, and order generation. The use of algorithms such as ARIMA, Prophet, CatBoost, and LSTM significantly reduces forecasting errors compared to traditional statistical methods. For instance, by implementing AI-based demand forecasting systems, companies can reduce excess inventory by approximately 30–35 % while simultaneously decreasing stockouts on retail shelves by around 20 % [3, 4, 6]. Furthermore, integrated AI-based platforms can automatically generate orders in ERP systems, taking into account time periods, service levels, multi-warehouse logic, and minimum supply lots.

In the field of vehicle and logistics equipment maintenance, the concept of predictive maintenance is being increasingly adopted, based on the analysis of IoT sensor data combined with machine learning methods. This approach enables the reduction of equipment downtime by up to 40%, lowers service costs by 25–30 %, and extends equipment lifespan [9]. Logistics centers of major technology corporations have implemented equipment condition monitoring systems with AI modules that generate alerts before a critical wear threshold is reached. One of the key directions of development is the implementation of the «control tower» concept, which ensures centralized coordination of logistics processes based on artificial intelligence [8, 10]. Such systems aggregate data from all levels of the logistics chain: GPS positioning, order statuses, vehicle load indicators, transportation conditions, warehouse data, customs clearance, payment processing, and more. AI-powered analytics capabilities are used to detect critical deviations, predict disruptions, and

automatically generate recommendations or decisions. Through cognitive modules built on fuzzy logic, these systems are capable of making decisions under uncertainty, even when data is incomplete or contradictory.

Blockchain is also finding wide application as a complement to artificial intelligence systems. It provides transparency and trust among logistics stakeholders by creating an immutable chain of records on product origin, routing, and condition [11]. In combination with AI analytics, blockchain enables real-time cargo tracking, supply source verification, and automatic execution of smart contracts, which, in turn, trigger subsequent actions – such as shipment from an alternative warehouse in the event of a delay. IBM Food Trust and VeChain are examples of platforms that integrate AI and blockchain to enhance transparency and decision-making speed. Recent developments increasingly utilize generative models that are capable not only of analyzing but also of creating new behavioral scenarios for logistics systems. In particular, large language models (LLMs) such as GPT are used for generating logistics documentation, modeling routes, communicating with suppliers through virtual assistants, and managing tender processes. Moreover, generative models are applied in the visualization of current and forecasted conditions in transport corridors, risk assessment related to supplier changes or country of origin, and the creation of simulations for new supply chain configurations.

Growing interest is also directed toward the concept of AIoT (Artificial Intelligence of Things), which involves the integration of artificial intelligence directly at the edge-device level [3, 5, 6, 10]. This allows data processing without transmission to the cloud, thereby reducing latency and enhancing autonomy. In logistics, this is particularly relevant for warehouses, ports, and transportation systems where decision-making within milliseconds is critical. For example, edge-AI modules are used in drones for navigation, in autonomous robots for decision-making within distribution centers, and in monitoring devices that process images or detect anomalies in real time without reliance on a central server.

It is also important to highlight the contribution of artificial intelligence to enhancing the environmental sustainability of logistics systems. AI algorithms analyze CO₂ emissions, identify routes with the lowest ecological footprint, and model the use of alternative fuels and electric transport. Companies oriented toward ESG strategies employ AI to assess environmental impact, build sustainability reporting, reduce waste disposal costs, and optimize packaging circulation.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

Alongside technological development, there is a growing demand for professionals capable of integrating, maintaining, and advancing AI solutions in logistics. This has led to the emergence of new professions: logistics data analyst, logistics AI systems architect, digital twin engineer, and AI ethics specialist in supply chains. At the same time, companies face a number of challenges, including data unification, cybersecurity, API standardization, compliance with national regulations on personal data processing, and automated management.

Despite the existing barriers, the trends of AI adoption in logistics remain irreversible. Commercial benefits such as cost reduction by 15–35 %, order processing acceleration by 25–40 %, forecast accuracy improvement up to 95 %, and flexibility in adapting to changing market conditions stimulate investors, governments, and the scientific community to continue integration efforts. Clearly, logistics is no longer merely a technical system but a digitally intelligent environment where machine agents collaborate with humans in decision-making, creating the foundation for self-regulated supply chains of the future.

Thus, against the backdrop of deep digital transformation, logistics emerges as a complex adaptive system evolving through the interaction of digital technologies, automation, intelligent solutions, and self-learning algorithms. Artificial intelligence, in particular, serves not only as a tool for productivity enhancement but also as a catalyst for a paradigm shift in supply chain management – from reactive to proactive, from manual to automated, from isolated to integrated. Modern solutions make it possible to manage logistics assets effectively in a dynamic environment, forecast demand, optimize routes, reduce losses, improve customer service quality, and strengthen the environmental sustainability of business operations. From an engineering standpoint, the integration of artificial intelligence into logistics represents a complex technical challenge that requires compatibility of hardware (edge devices, sensors, robotic platforms), flexibility in configuring software infrastructure, high reliability of data transmission channels, protection against cyberattacks, and compliance with data processing regulations. At the same time, the advancement of artificial intelligence in logistics systems necessitates a rethinking of planning methodologies, staff retraining, and the creation of hybrid teams consisting of logisticians, data analysts, security specialists, model developers, and managers capable of systemic team-oriented thinking under technological complexity.

The effectiveness of AI implementation depends not only on the availability of relevant technologies but also on the organizational maturity of enterprises, their readiness for change, strategic vision, and data-driven decision-making culture. The logistics of the future is not simply an automated warehouse or a self-driving truck – it is an ecosystem in which human intelligence is augmented by artificial intelligence, ensuring the capacity for continuous adaptation, learning, improvement, and development.

CONCLUSIONS

The expansion of artificial intelligence applications in logistics will enable the formation of fully autonomous supply chains, where all operations – from demand generation to final delivery – will be coordinated in real time with minimal human intervention [12]. Under such conditions, enterprise competitiveness will be determined not only by the availability of vehicles or warehouse capacity but also by the ability to create digital logistics platforms with powerful analytics, advanced decision-making algorithms, and deep integration with global data networks. The integration of artificial intelligence into logistics is no longer a prospect but a present reality that is transforming the technological landscape, economic approaches, environmental standards, and management practices. The successful use of these technologies will determine the level of national innovation capacity, business efficiency, supply chain continuity, and market stability under global challenges.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Automation in logistics: Big opportunity, bigger uncertainty. McKinsey & Company. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/automation-in-logistics-big-opportunity-bigger-uncertainty>.
2. PwC. Connected and autonomous supply chain ecosystems 2025. Available from: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industrial-manufacturing/digital-supply-chain.html>.
3. Що таке Edge Networking і чому це важливо? (2025). Available from: <https://fiberroad.com/uk/solutions/edge-networking/what-is-edge-networking-and-why-does-it-matter/>.
4. How AI transforms logistics and forecasting in supply chain. Available from: <https://alfapeople.com/how-ai-transforms-logistics-and-forecasting-in-supply-chain/>.
5. AI in Logistics: Benefits, Applications & Leading Examples Available from: <https://www.elifotech.com/insights/ai-in-logistics-explained/>.
6. Autonomous Mobile Robots - Delivered – Global. Available from: <https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/autonomous-mobile-robots-in-action.html>.
7. Майбутнє вже тут: стартап TuSimple запускає комерційний сервіс доставки вантажів за допомогою власних робофур. Available from: <https://mezha.media/2022/02/03/tusimple-commercializes-robotic-trucks/>.
8. Коломийчук Д. А. Дослідження застосування генетичних алгоритмів для змагальних атак на багатозадачні глибокі нейронні мережі : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра, спец. 122 – комп'ютерні науки. 2025. 76 с.
9. AI in Supply Chain Management: Powering Smarter Operations. Available from: <https://www.coupa.com/blog/ai-in-supply-chain-management-powering-smarter-operations/>.
10. Amazon AWS Control Tower спрямована на захист ваших кордонів даних. Available from: <https://hackyourmom.com/novyny/amazon-aws-control-tower-spryamovana-na-zahyst-vashyh-kordoniv-danyh/>.
11. Штучний інтелект і технологія блокчейн. Available from: <https://cryptomus.com/uk/blog/at-the-intersection-of-ai-and-blockchain-promising-applications-emerge?srsId=AfmBOopRyCiKwC-yfOH-w-zO6BvAnjb53g8p97J1zGlg5HXONS7FSJNK>.
12. Птиця Н.В., Беляєва В.А. Цифрові можливості для оптимізації ланцюгів постачання. Збірник тез доповідей Міжн. наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика». Харків: ХНАДУ, 2024. С. 3–4.

REFERENCES

1. Automation in logistics: Big opportunity, bigger uncertainty. McKinsey & Company. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/automation-in-logistics-big-opportunity-bigger-uncertainty>.
2. PwC. Connected and autonomous supply chain ecosystems 2025. Available from: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industrial-manufacturing/digital-supply-chain.html>.

3. Що таке Edge Networking і чому це важливо? (2025). Available from: <https://fiberroad.com/uk/solutions/edge-networking/what-is-edge-networking-and-why-does-it-matter/>.
4. How AI transforms logistics and forecasting in supply chain. Available from: <https://alfapeople.com/how-ai-transforms-logistics-and-forecasting-in-supply-chain/>.
5. AI in Logistics: Benefits, Applications & Leading Examples Available from: <https://www.eliftech.com/insights/ai-in-logistics-explained/>.
6. Autonomous Mobile Robots - Delivered – Global. Available from: <https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/autonomous-mobile-robots-in-action.html>.
7. Maibutnie vzhe tut: startap TuSimple zapuskaie komertsiinyi servis dostavky vantazhiv za dopomohoiu vlasnykh robofur. Available from: <https://mezha.media/2022/02/03/tusimple-commercializes-robotic-trucks/>.
8. Kolomyichuk D. A. Doslidzhennia zastosuvannia henetychnykh alhorytmiv dlia zmahalnykh atak na bahatozadachni hlyboki neironni merezhi : robota na zdobuttia kvalifikatsiinoho stupenia mahistra, spets. 122 – kompiuterni nauky. 2025. 76 s.
9. AI in Supply Chain Management: Powering Smarter Operations. Available from: <https://www.coupa.com/blog/ai-in-supply-chain-management-powering-smarter-operations/>.
10. Amazon AWS Control Tower spriamovana na zakhyst vashykh kordoniv danykh. Available from: <https://hackyourmom.com/novyny/amazon-aws-control-tower-spryamovana-na-zahyst-vashykh-kordoniv-danykh/>.
11. Shtuchnyi intelekt i tekhnolohiia blokchein. Available from: <https://cryptomus.com/uk/blog/at-the-intersection-of-ai-and-blockchain-promising-applications-emerge?srsltid=AfmBOopRyCiKwC-yfOH-w-zO6BvAnjb53g8p97J1zGlg5HXONs7FSJNK>.
12. Ptytsia N.V., Bieliaieva V.A. (2024) Tsyfrovi mozhlyvosti dlia optymizatsii lantsiuhiv postachannia. Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni problemy funktsionuvannia lohistychnykh system. Stalyi rozvytok transportnykh system: nauka i praktyka». Kharkiv: KhNADU. 3–4.

Птиця Н.В., Птиця Г.Г. Роль штучного інтелекту у формуванні адаптивних і сталих ланцюгів постачання

У статті розглянуто роль штучного інтелекту (ШІ) у цифровій трансформації логістичних систем. Проаналізовано практичні переваги впровадження ШІ, зокрема оптимізацію управління ланцюгами постачання, прогнозування попиту, зниження операційних витрат, підвищення швидкості доставки та покращення якості обслуговування клієнтів. Особливу увагу приділено внеску ШІ у забезпечення екологічної стійкості, аналізу викидів CO₂, підтримці використання альтернативних видів палива, оптимізації циклів пакування та інструментам для ESG-стратегій. Визначено нові професійні напрями у сфері логістики, серед яких – аналітик даних, архітектор AI-систем, інженер цифрових двійників і фахівець з етики використання ШІ у ланцюгах постачання. Окреслено основні виклики, пов'язані з уніфікацією даних, кібербезпекою, стандартизацією API та дотриманням регламентів щодо автоматизованої обробки даних. Підкреслено, що ефективність використання ШІ залежить не лише від доступності технологій, а й від організаційної зрілості підприємства.

Ключові слова: логістика, штучний інтелект, управління ланцюгами постачання, цифрова трансформація, екологічна стійкість, прогнозна аналітика, автоматизація.

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>

ПТИЦЯ Геннадій Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри організації і безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, e-mail: gennadij.ptitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5061-0144>

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>

PTYTSIA Hennadii, Ph. D. of Engineering, Associate Professor at the Department of Traffic Management and Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: gennadij.ptitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5061-0144>

Дата надходження статті до видання: 16.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1913

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Hryn A.P., Frolov M.O., Bernatskyi A.V.
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

INFLUENCE OF LASER WELDING PARAMETERS ON THE GEOMETRY OF WELDED JOINTS OF THIN-SHEET STAINLESS STEEL AISI 304

Laser welding is one of the most promising methods of joining metals, combining high precision, minimal thermal deformation, and the possibility of process automatization. Due to the high energy density of the laser beam, the technology provides deep penetration with a narrow heat-affected zone, making it effective for welding corrosion-resistant austenitic steels, in particular AISI 304. At the same time, the peculiarities of thermal processes in laser welding, such as intense heating and rapid cooling of the metal, significantly affect the formation of the structure and properties of the welded joint, so the choice of optimal modes is crucial for preventing defects and ensuring high quality of the welded joint. The paper presents the results of an experimental and statistical study of the laser welding process of 1.5 mm thick AISI 304 steel using response surface methodology (RSM). The aim of the study was to determine the patterns of influence of the main parameters of laser welding on the formation of the geometry of the welded joint. Based on a factorial experiment, regression models were developed to describe the change in the area and width of the weld depending on changes in process parameters. Analysis of the results has shown that the main factors determining the geometry of the joint are the power of the laser radiation and the welding speed. Increasing the laser power contributes to an increase in the weld area, while increasing the speed reduces it. At high values of laser radiation power, the process becomes more stable, and the weld geometry becomes less sensitive to parameter changes. Laser beam defocusing has a negligible effect, only slightly increasing the width of the weld. The most pronounced interaction was found to be between power and speed, which tends to determine the maximum values of the weld area. The developed regression equations with a deviation of less than 10% confirmed the adequacy of the model and the effectiveness of using RSM to predict the geometry of the welded joint. The optimal welding modes identified in the study ensure the formation of high-quality, defect-free joints that correspond to quality level "B" according to EN ISO 13919-1:2019.

Keywords: laser welding, thin-walled products, welding process optimization, response surface methodology, stainless steels, AISI 304.

INTRODUCTION

Laser welding is one of the most promising modern methods of joining metals. This technology is actively growing due to its unique advantages over traditional welding methods. Compared with plasma, microplasma, and argon arc (TIG) welding, laser welding is characterized by higher precision in the formation of welded joints, minimal thermal deformation and residual stresses, as well as a significantly higher process speed [1, 2]. This is due to the high energy density of the laser beam at the focal point, which allows deep penetration with a minimal heat-affected zone. Due to the combination of high quality, reproducibility of results, and the possibility of process automatization, laser welding has become an integral technology in the production of products for the aviation, automotive, electronic, energy, medical industries, etc.

One of the most widely used steels in industry that can be welded using laser radiation is austenitic corrosion-resistant steel, such as AISI 304. This material has a range of technological and operational advantages: low thermal conductivity, high resistance to oxidation and aggressive environments, stability of mechanical properties at elevated temperatures, and the ability to effectively absorb laser radiation [3, 4]. At the same time, the peculiarities of thermal processes during laser welding - rapid heating and cooling - significantly affect the structure formation, phase transformations, and mechanical properties of austenitic steels, distinguishing their behavior from the reaction to welding with high heat input [5]. One of the main problems during the welding of corrosion-resistant steels is sensitization, a process in which part of the chromium in the alloy binds with carbon to form Cr_{23}C_6 carbides along the grain boundaries. This leads to local depletion of the solid solution of chromium and, as a result, to a decrease in the corrosion resistance of the welded joint [6]. To prevent this phenomenon, it is necessary to take into account the parameters of laser welding and the cooling rate.

The formation of the geometry of a welded joint, in particular its penetration depth and width, significantly depends on the technological parameters of welding, such as laser radiation power, welding speed, laser beam defocusing, and the composition and flow rate of the shielding gas [7]. Even slight changes in these parameters can lead to defects such as undercut, incomplete fusion, porosity, or burn-through [8]. Therefore, selecting the optimal parameters is crucial for achieving the required balance between the depth, width, and shape of the welded joint.

In this regard, it is particularly important to develop mathematical models that describe the relationship between the technological parameters of the process and the characteristics of the resulting joint. Such models make it possible not only to interpret the results of experiments, but also to predict the behavior of the system under various combinations of parameters, which significantly reduces the number of experimental studies and saves time and resources [9].

To improve the efficiency of research and the accuracy of forecasting, numerical and statistical methods for optimizing technological parameters have been actively implemented in recent years. In particular, Response Surface Methodology (RSM) allows for determination of the relationships between process parameters and system response [9]. This method also allows optimization of the expected characteristics of a welded joint by adjusting technological parameters such as laser power, welding speed, and beam defocusing. It is effectively used to build mathematical models that predict output parameters, such as penetration depth, aspect ratio, and joint area, while determining the optimal combination of input parameters [10]. The Taguchi method aims to reduce the influence of random factors and ensure process stability using orthogonal matrices and statistical analysis of variance [11]. In addition, genetic algorithms (GA) and artificial neural networks (ANN) are used to model complex nonlinear dependencies, which allow effectively finding the optimal process conditions even with a large number of interacting factors [12, 13].

LITERATURE ANALYSIS AND PROBLEM STATEMENT

Response Surface Methodology (RSM) is an effective statistical approach to modeling and optimizing processes where the result depends on several variables. When planning laser welding experiments, this method allows for investigation of the relationship between power, speed, focus position, gas protection parameters, and joint characteristics. The use of RSM makes it possible to reduce the number of experiments, identify key influencing factors, and obtain optimal welding modes with minimal heat input and defects. For this reason, this method has been widely used to analyze and improve laser welding processes in recent years, as confirmed by the results of a number of studies.

In a study by Vijayan et al. [9], the effectiveness of RSM and genetic algorithm (GA) methods was compared in optimizing the parameters of laser welding of low-carbon steel. The experiments were conducted on 7 mm thick plates using a CO₂ laser with power of up to 3.5 kW. Power, speed, and focal length were selected as variables. The models developed using RSM proved to be quite accurate (R^2 of up to 0.87). It was found that with an increase in power, the penetration depth increases, while with an increase in speed, it decreased. RSM showed better accuracy and reliability in determining the optimal modes compared to the GA method.

Chellu et al. [14] applied RSM to optimize the welding of 2.5 mm thick AISI 304 steel using a CO₂ laser. This paper focused on studies of the effect of welding power and speed on weld width, penetration depth, and heat input. The study confirmed that increasing the power deepens the weld, but excess heat widens it and increases the heat affected zone (HAZ), while increasing the speed reduces the depth but improves the depth-to-width ratio. The optimal modes ensured minimal thermal impact and a stable weld shape.

In the work of Touileb et al. [10], RSM was used to study the influence of laser welding parameters and sulfur content on the shape of a 2 mm thick AISI 316 steel weld. It was found that the focal length and amount of sulfur significantly affect the convection currents in the molten pool and the penetration depth. For steel with a high sulfur content, deeper, narrower welds were formed, while for steel with a low sulfur content, wider and shallower welds were formed. The best results in this study were obtained at a laser power of 5 kW, a welding speed of 2.4 m/min, a focal length of 2 mm, and the use of 100% helium as a shielding gas.

Thus, all the considered studies confirm the effectiveness of RSM as a method for determining the influence of laser welding process parameters on weld geometry. However, the complex influence of material composition, welding parameters, and gas protection require further study to ensure process stability and improve joint quality.

AIM AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

The aims of this study are:

1. Optimization of the laser welding process of thin-walled stainless steel AISI 304 with a thickness of 1.5 mm using response surface methodology (RSM);
2. Selection of optimal welding parameters that ensure creation of defect-free welded joints.

RESULTS OF RESEARCH

The optimization of laser welding parameters for 1.5 mm thick AISI 304 stainless steel was performed using response surface methodology (RSM). For this purpose, the laser welding parameters were coded (Table 1) and an experimental matrix was planned (Table 2) based on a simple polynomial model, equation (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_kx_k(1)$$

Table 1. Coding of laser welding parameters

Coding	-1	0	+1
Laser radiation power (P), kW	1,5	2,5	3,5
Welding speed (V), m/min	1,5	2,5	3,5
Laser beam defocusing value (ΔF), mm	0	+2	+3

The following independent variables were selected: laser power (P), welding speed (V), and laser beam defocusing (ΔF). The response function Y was selected as the weld area Y_s and weld width Y_b.

Таблиця 2. Матриця експерименту

№	1	2	3	P, kW	V, m/min	F, mm	№	1	2	3	P, kW	V, m/min	F, mm
1	1	1	1	1,5	1,5		5			1	2,5	2,5	3
2	1	1		1,5	1,5	2	6		1	1	2,5	3,5	
3	1	1	1	1,5	1,5	3	7		1		2,5	3,5	2
4	1		1	1,5	2,5		8		1	1	2,5	3,5	3
5	1			1,5	2,5	2	9	1	1	1	3,5	1,5	
6	1		1	1,5	2,5	3	20	1	1		3,5	1,5	2
7	1	1	1	1,5	3,5		21	1	1	1	3,5	1,5	3
8	1	1		1,5	3,5	2	22	1		1	3,5	2,5	
9	1	1	1	1,5	3,5	3	23	1			3,5	2,5	2
10		1	1	2,5	1,5		24	1		1	3,5	2,5	3
11		1		2,5	1,5	2	25	1	1	1	3,5	3,5	
12		1	1	2,5	1,5	3	26	1	1		3,5	3,5	2
13			1	2,5	2,5		27	1	1	1	3,5	3,5	3
14				2,5	2,5	2							

Based on the compiled experiment matrix, bead-on-plate welding was performed. A Rofin-Sinar DY044 solid-state laser with a maximum laser power of P = 4.4 kW and a wavelength of λ = 1.06 μm was used for the experiments. The chemical composition of AISI 304 steel is shown in Table 3.

Table 3. Chemical composition of AISI 304 steel, % by wt.

C	Si	Mn	N	S	P	Cr	Cu	Ti	F
≤0,08	≤0,8	≤2,00	9,00 – 11,00	≤0,02	≤0,035	17,00 – 19,00	≤0,3	≤0,5	Bal.

The bead-on-plate welds obtained were certified in accordance with EN ISO 13919-1:2019 for the presence of such weld defects as pores, undercuts, lack of fusion, and other defects specified by this standard. In addition to identifying visual defects, the quality of gas protection of the welding zone was also taken into account. Welded joints with obvious heat tints and non-penetrations (experiments 4, 7-9) were not taken into account when determining the optimal welding modes.

Cross-sections, made from the obtained welds, were examined using optical microscopy, and the area and width of the welds were measured. The results of the measurements are shown in Table 4.

Table 4. Results of measurements of the area and width of the obtained welds

Sample No.	Area, mm ²	Width, mm	Sample No.	Area, mm ²	Width, mm
1	1,81	1,97	15	1,57	1,61
2	2	1,83	16	1,29	1,55
3	2,26	1,94	17	1,41	1,36

Continued from Table 4.

Sample No.	Area, mm ²	Width, mm	Sample No.	Area, mm ²	Width, mm
4	0,94	1,44	18	1,38	1,41
5	1,38	1,5	19	2,53	1,81
6	1,23	1,46	20	2,62	1,71
7	0,7	1,28	21	2,54	1,9
8	0,83	1,25	22	2,04	1,87
9	0,67	1,23	23	2,07	1,59
10	2,43	1,45	24	2,15	1,8
11	2,6	1,52	25	1,59	1,64
12	2,43	1,92	26	1,7	1,61
13	1,68	1,61	27	1,87	1,4
14	1,6	1,5			

To develop a linear regression equation for the area and width of welds (2), it is necessary to determine the regression coefficients of the main factors b_0, b_1, b_2, b_3 using formulas (3) and (4), as well as the interaction coefficients between factors b_{12}, b_{13}, b_{23} , using formula (5):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (3)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}Y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad (4)$$

$$b_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ji}x_{ji})Y_i}{\sum_{i=1}^N (x_{ji}x_{ji})^2} \quad (5)$$

As a result of the calculations, regression coefficients for the weld area were obtained: $b_0 = 1,752, b_1 = 0,405, b_2 = -0,543, b_3 = 0,06, b_{12} = 0,11, b_{13} = -0,02, b_{23} = -0,01$.

After substituting the obtained regression coefficient values and independent variable designations into the formula (2), the regression equation for the weld area (6) was obtained:

$$Y_s = 1,752 + 0,405P - 0,543V + 0,06\Delta F + 0,11PV - 0,02P\Delta F - 0,01V\Delta F \quad (6)$$

Similarly, the regression equation for the width of weld was calculated (7):

$$Y_b = 1,598 - 0,184P + 0,079V + 0,002\Delta F + 0,1PV - 0,08P\Delta F - 0,01V\Delta F \quad (7)$$

Based on the regression coefficients of equations for the area (6) and width (7) of welds, vector diagrams were created to show the influence of factors and their interaction on the area and width of welds (Fig. 1 a, b).

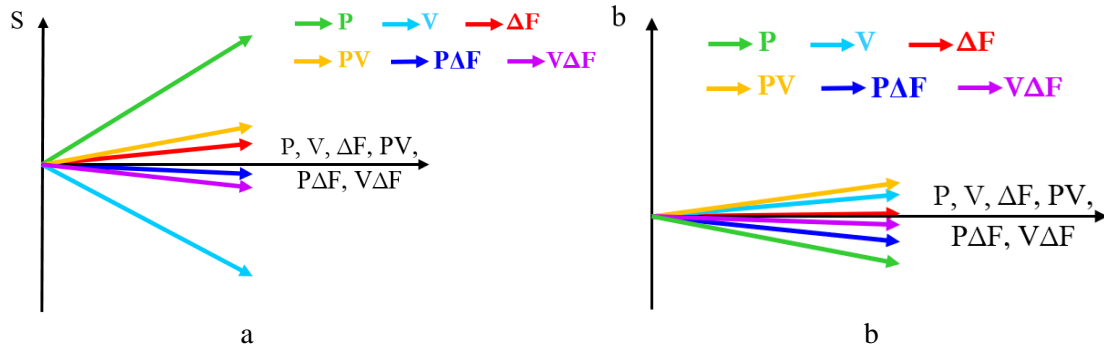


Fig. 1. Vector diagrams of the influence of factors on: (a) weld area, (b) weld width

The vector diagram of the influence of factors on the weld area (Fig. 1a) shows that the speed of laser welding has the most significant impact on the weld area. As the welding speed increases, the area decreases, and this effect is more pronounced than the effect of other individual factors. The second most important factor is the power of the laser radiation. Its increase contributes to an increase in the area, and this effect is slightly weaker than the effect of power, but they act in opposite directions. Beam defocusing has the least effect and causes only a slight increase in area. Between the interactions, the most significant is the combination of power and welding speed, which leads to an increase in the weld joint area. The interactions between power and defocusing, as well as between speed and defocusing, have a negligible negative effect.

The vector diagram of the influence of factors on the weld width (Fig. 1b) shows that the laser radiation power has the most negative effect – as the power increases, the width decreases. The welding speed also reduces the width, but to a much lesser extent. Defocusing has the opposite effect, contributing to a slight increase in the weld width. The most noticeable interaction is the combination of power and speed, which amplifies the influence of the main factors.

The calculated values of the area and width of the welds were also determined. The deviation from the experimental values was less than 10%, which confirms the adequacy of the obtained regression equations.

In addition to vector diagrams, graphs of the dependence of the influence of laser welding parameters on the weld area were created. These graphs correlate well with the vector diagrams of the influence of factors.

As can be seen from the graphs in Figure 2, with an increase in welding speed, the weld area decreases regularly for all power levels considered. At a power of 1.5 kW (Fig. 2a), there is a noticeable decrease in area from approximately 2.0 mm² to 0.7 mm² when the speed increases from 1.5 to 3.5 m/min. The largest values of the area are observed when the beam is defocused by +3 mm, especially at low speeds, while at a laser beam defocus of 0 mm, the weld penetration is shallower. For a power of 2.5 kW (Fig. 2b), a similar trend is observed. With increasing speed, the welded joint area decreases from 2.6 mm² to about 1.3 mm². However, the effect of beam defocusing is not as pronounced here, and the curves are more gradual. At a power of 3.5 kW (Fig. 2c), the decrease in area with increasing welding speed is less intense, and the absolute values of the areas are larger – from 2.6 mm² to 1.6 mm². Thus, increasing the power of the laser radiation reduces the effect of the welding speed on the weld area, which contributes to a more stable weld formation.

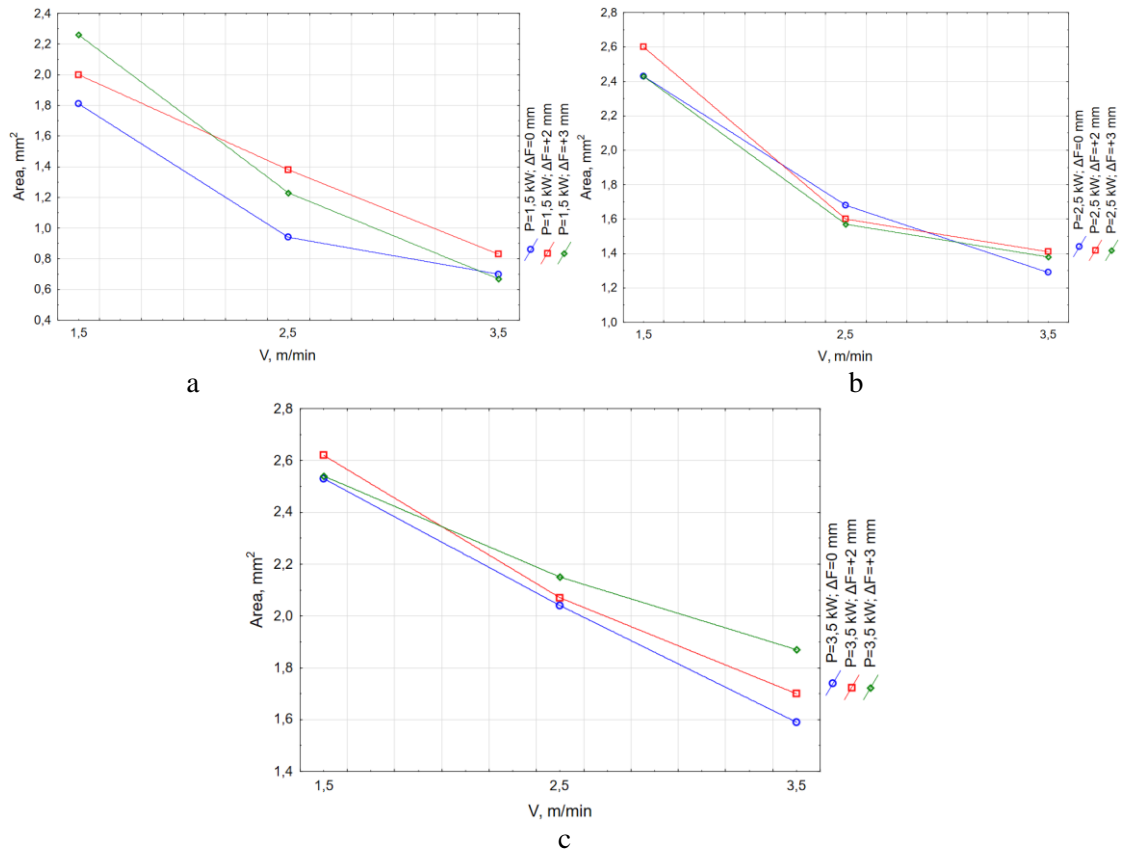
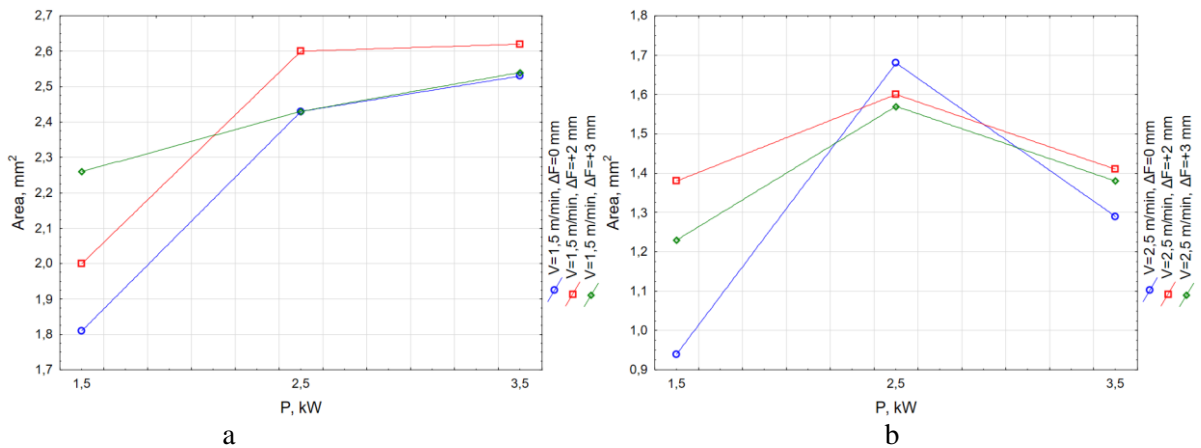


Fig. 2. Graphs of dependence of weld area on welding speed at laser radiation power: (a) 1.5 kW; (b) 2.5 kW; (c) 3.5 kW

The graphs in Figure 3 show the dependence of the weld area on the laser power when the welding speed is changed. An increase in the laser power leads to a regular increase in the weld area, and this dependence is more noticeable at low welding speeds. At a speed of 1.5 m/min (Fig. 3a), the area increases from 1.8–2.0 mm² at a power of 1.5 kW to 2.5–2.6 mm² at 3.5 kW. The largest area is formed at a beam defocus of +2 mm, which indicates a more uniform distribution of energy at the beam focus point. At a speed of 2.5 m/min (Fig. 3b), the area also increases with increasing power, but the effect of defocusing is less significant in this case. At a speed of 3.5 m/min (Fig. 3c), the increase in area with increasing power is maintained, but the amplitude of changes decreases from 0.7 mm² to 1.8 mm². This indicates that with an increase in the power of laser radiation, the process becomes more stable even at high welding speeds.



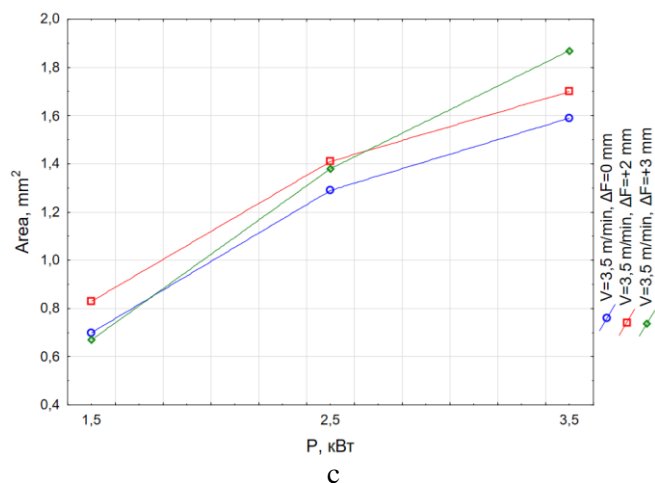


Fig. 3. Graphs of dependence of weld area on laser power at welding speeds: (a) 1.5 m/min; (b) 2.5 m/min; (c) 3.5 m/min

Based on the results of weld geometry research, three welding modes with the same energy input of 60 J/mm and laser beam defocusing of 0 mm were selected, which ensure high-quality welds in terms of geometry, gas protection quality, and defect-free welds, and correspond to the highest level “B” according to EN ISO 13919-1:2019 (Fig. 4).

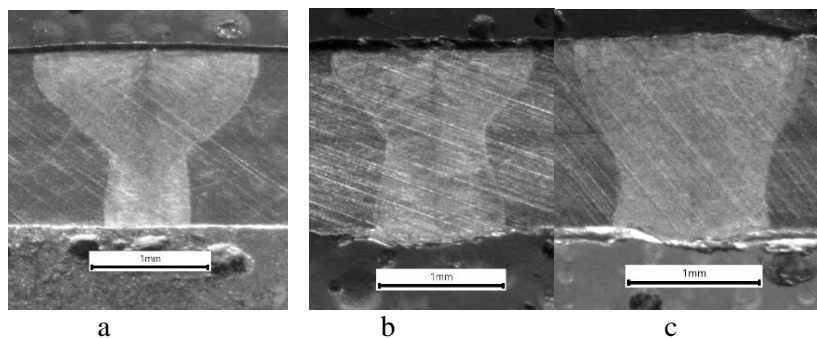


Fig. 4. Cross sections of welds made at optimal welding parameters: (a) $P=1.5$ kW; $V=1.5$ m/min; $\Delta F=0$ mm; (b) $P=2.5$ kW; $V=2.5$ m/min; $\Delta F=0$ mm; (c) $P=3.5$ kW; $V=3.5$ m/min; $\Delta F=0$ mm

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

The results of laser welding of 1.5 mm thick AISI 304 steel using response surface methodology (RSM) demonstrate the effectiveness of the proposed approach for quantitative assessment of the influence of technological parameters on the shape and geometry of the weld. The use of RSM made it possible to systematically investigate the interaction of laser power, welding speed, and laser beam defocusing and to determine their contribution to the stability of weld formation.

Comparing the results of studies on welding AISI 304 steel with the results of Touileb et al. [10] on welding AISI 316 steel, the following conclusion can be drawn. Under conditions of similar geometric scales and steel types, the influence of the main technological factors is similar. Laser beam defocusing and radiation power determine the depth of penetration, while speed affects the area and width. At the same time, for AISI 316 steel with a higher sulfur content, there is significantly greater variability in the geometry of the penetration due to changes in convection currents, while welding of AISI 304 steel without modifying additives demonstrates a more predictable and stable geometry of the joint. As the power of the laser radiation increases, the process becomes more thermodynamically stable and the effect of defocusing weakens, which is consistent with the conclusions of Touileb et al. In general, the results indicate the feasibility of optimizing laser welding parameters based on a balance between power and welding speed with a correctly selected defocusing value of the laser radiation, which ensures efficient energy absorption and optimal weld geometry.

CONCLUSIONS

During the research, an analysis was conducted of the influence of laser welding parameters on the geometry of welds in stainless steel AISI 304 with a thickness of 1.5 mm. It was established that the main factors determining the area and width of the weld are the power of the laser radiation and the welding speed.

With an increase in laser radiation power, the weld area increases regularly, especially at low welding speeds, and at high radiation power, the weld is formed more stably and its geometry is less dependent on changes in welding speed. Defocusing the beam has a less noticeable effect, contributing to a slight increase in the area and width of the weld. The interaction between power and welding speed is the most significant among the combinations of parameters and determines the maximum weld area. The obtained regression equations reproduce the experimental data well with a deviation of less than 10%, which confirms their adequacy for predicting the geometry of welds. As a result, it was determined that the optimal welding modes with a linear energy of 60 J/mm and a laser beam defocusing of 0 mm provide high-quality defect-free welds and correspond to the highest quality level “B” according to EN ISO 13919-1:2019.

REFERENCES

1. Deepak, J., RP, A., & Sundar, S. S. (2023). Applications of lasers in industries and laser welding: A review. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.102>
2. 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>
3. Yurchenko, Yu. V., Suchek, O. M., Kurylo, V. A., Siora, O. V., Sokolovskyi, M. V., & Bernatskyi, A. V. (2024). Rozrobka laboratorneho ustatkuvannia dlia vyhotovlennia plaskykh ta tsylindrychnykh zrazkiv z tonkolystovoho materialu z vykorystanniam tekhnologii lazernoho zvariuvannia. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu*, 1(88), 156–160. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.20>
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. Yurchenko, Yu. V., Siora, O. V., Sokolovskyi, M. V., Nabok, T. M., & Bernatskyi, A. V. (2025). Vidpratsiuvannia tekhnologii lazernoho zvariuvannia tonkostinnykh tsylindrychnykh vyrobiv zi stali 12Kh18N10T. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 1, 15–26. [https://doi.org/10.15589/smi2025.1\(20\).02](https://doi.org/10.15589/smi2025.1(20).02)
6. Srinivasan, N. (2021b). Sensitization of Austenitic Stainless steels: current developments, trends, and future directions. *Metallography Microstructure and Analysis*, 10(2), 133–147. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00724-y>
7. Mohammed, G. R., Ishak, M., Aqida, S. N., & Abdulhadi, H. A. (2017). Weld bead profile of laser welding dissimilar joints stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 257, 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/257/1/012072>
8. Mohammed, G., Ishak, M., Aqida, S., & Abdulhadi, H. (2017). Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: a review. *Metals*, 7(2), 39. <https://doi.org/10.3390/met7020039>
9. Vijayan, K., Ranjithkumar, P., & Shanmugarajan, B. (2018). Comparison of response surface methodology and genetic algorithm in parameter optimization of laser welding process. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 12(1), 239–248. <https://doi.org/10.18576/amis/120124>
10. Touileb, K., Attia, E., Djoudjou, R., Benselama, A., Ibrahim, A., Boubaker, S., Ponnore, J., & Ahmed, M. M. Z. (2023). Laser weld aspect optimization of thin AISI 316 SS using RSM in relation with welding parameters and sulfur content. *Metals*, 13(7), 1202. <https://doi.org/10.3390/met13071202>
11. Huang, Y., Gao, X., Ma, B., Liu, G., Zhang, N., Zhang, Y., & You, D. (2020). Optimization of weld strength for laser welding of steel to PMMA using Taguchi design method. *Optics & Laser Technology*, 136, 106726. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106726>
12. Wu, J., Lian, K., Deng, Y., Jiang, P., & Zhang, C. (2021). Multi-Objective parameter optimization of fiber laser welding considering energy consumption and bead geometry. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(4), 3561–3574. <https://doi.org/10.1109/tase.2021.3126077>
13. Li, R., Dong, M., & Gao, H. (2021). Prediction of Bead Geometry with Changing Welding Speed Using Artificial Neural Network. *Materials*, 14(6), 1494. <https://doi.org/10.3390/ma14061494>
14. Chellu, P. K., Padmanaban, R., Vignesh, R. V., Menon, A. S., Shariff, S. M., & Padmanabham, G. (2019). Experimental study on laser welding of AISI 304 steel with design of experiments approach. *IOP*

Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Гринь А.П., Фролов М.О., Бернацький А.В.
Вплив параметрів лазерного зварювання на геометрію зварних з'єднань тонколистової корозійностійкої сталі AISI 304

Лазерне зварювання є одним із найперспективніших методів з'єднання металів, що поєднує високу точність, мінімальні термічні деформації та можливість автоматизації процесу. Завдяки високій щільності енергії лазерного променя технологія забезпечує глибоке проплавлення при вузькій зоні термічного впливу, що робить її ефективною для зварювання корозійностійких сталей аустенітного класу, зокрема AISI 304. Водночас особливості теплових процесів при лазерному зварюванні, такі як інтенсивний нагрів і швидке охолодження металу – істотно впливають на формування структури та властивостей зварного з'єднання, тому вибір оптимальних режимів має вирішальне значення для запобігання дефектам і забезпечення високої якості зварного з'єднання. У роботі представлено результати експериментального та статистичного дослідження процесу лазерного зварювання сталі AISI 304 товщиною 1,5 мм із застосуванням методології поверхні відгуку (RSM). Метою дослідження було визначення закономірностей впливу основних параметрів лазерного зварювання на формування геометрії зварного з'єднання. На основі повнофакторного експерименту побудовано регресійні моделі, що описують зміну площі та ширини провару залежно від зміни параметрів процесу. Аналіз результатів показав, що основними факторами, які визначають геометрію з'єднання, є потужність лазерного випромінювання та швидкість зварювання. Збільшення потужності сприяє зростанню площі провару, тоді як підвищення швидкості зменшує її. При високих потужностях лазерного випромінювання процес стає стабільнішим, а геометрія провару менш чутливою до коливань параметрів. Розфокусування чинить незначний вплив, лише трохи збільшуючи ширину провару. Найбільш вираженою виявилася взаємодія потужності та швидкості, яка визначає максимальні значення площі проплавлення. Розроблені регресійні рівняння з відхиленням менше 10 % підтвердили адекватність моделі й ефективність використання RSM для прогнозування геометрії зварного з'єднання. Оптимальні режими зварювання, що були визначені в ході дослідження, забезпечують формування якісних, бездефектних з'єднань та відповідають рівню якості «В» згідно з EN ISO 13919-1:2019.

Ключові слова: лазерне зварювання, тонкостінні вироби, оптимізація процесу зварювання, методологія поверхні відгуку (RSM), корозійностійкі високолеговані сталі, AISI 304.

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>.

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>

СОКОЛОВСЬКИЙ Микола Володимирович, провідний інженер-технолог відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: m_sokolovskyi@paton.kiev.ua. <http://orcid.org/0000-0003-3243-5060>

ГРИНЬ Андрій Петрович, інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: hryn@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0009-0003-1109-5578>

ФРОЛОВ Михайло Олександрович, інженер-технолог II категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: frolov@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0009-0002-7869-9360>

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>

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>.

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>

Mykola SOKOLOVSKYI, Lead Engineer-Technologist 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: m_sokolovskyi@paton.kiev.ua. <http://orcid.org/0000-0003-3243-5060>

Andrii HRYN, Engineer-Technologist, 1-st category 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: hryn@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0009-0003-1109-5578>

Mykhailo FROLOV, Engineer-Technologist, 2-nd category 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: frolov@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0009-0002-7869-9360>

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: 28.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1914

Zytsev Y.V., Voroshylov P.A. Sheverdin I.M.
Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

EXPERIMENTAL EVALUATION OF METHODS FOR CALCULATING VEHICLE ACCELERATION TIME

The article demonstrates that the advancement of automobiles inevitably leads to a dramatic increase in the complexity of the mathematical description of their motion. Modern vehicles are complex technical systems comprising numerous interconnected components and subsystems - electronic, mechanical, hydraulic, and pneumatic - each of which influences the overall dynamic properties of the vehicle. Consequently, the use of simple analytical relationships becomes ineffective: they do not fully account for the real physical processes occurring during acceleration, braking, gear shifting, or changing road conditions. To calculate acceleration time standards during vehicle diagnostics, it is advisable to use numerical methods that allow for the consideration of a large number of parameters, including engine power and torque, transmission characteristics, air and rolling resistance, mass distribution, and road surface conditions. Such methods ensure the required accuracy regardless of the complexity of the mathematical model and allow for the description of nonlinear processes, transient conditions, and random parameter deviations.

The use of numerical models also opens up extensive opportunities for conducting virtual tests and preliminary predictions of vehicle performance without the need for costly in-kind experiments. This is especially important when developing automatic diagnostic systems that can analyze unit operating parameters in real time and identify deviations from the norm. Furthermore, numerical methods make it possible to optimize vehicle design at the design stage, select optimal engine and transmission operating modes, reduce fuel consumption, and improve driving safety. The ideas presented in the article are supported by calculations of specific examples and a comparison of the obtained results with experimental data, demonstrating the validity and practical applicability of the proposed approach. The results of this work can be used in the development of intelligent technical control systems, modeling vehicle dynamics, and improving methods for assessing their performance.

Key words: car, wheel, acceleration, calculation, numerical methods, discretization, step, Hyundai Accent, Honda Accord.

INTRODUCTION

The modern automotive and transportation industries are increasingly focused on reducing their negative impact on the environment, particularly thermal and greenhouse emissions. Addressing this challenge is directly linked to the need to reduce fuel consumption, especially hydrocarbon fuel. An important area of development in this area is improving the theoretical foundations of vehicle and engine design, which allows for the creation of more fuel - efficient and environmentally friendly vehicles.

Maintaining the technical condition of rolling stock is a key task for transportation workers. This requires promptly identifying and eliminating faults, which is achieved through regular diagnostics and forecasting of vehicle technical conditions. Modern vehicles are typically equipped with built-in self-diagnostic systems capable of monitoring the condition of key components and assemblies. However, in Ukraine, the share of such vehicles remains relatively small. According to [1], the average age of the passenger car fleet is approximately 15.5 years, indicating a significant degree of wear and tear and obsolescence.

Furthermore, the number of specialized traction testers required for accurate diagnostics remains limited. In this regard, simplified methods for checking the technical condition of a vehicle, which can be performed directly by the user without the use of complex equipment or the need for specialized knowledge, are particularly important. Such methods include, for example, determining the vehicle's acceleration or coastdown time and subsequently comparing the obtained values with established standards [2]. These approaches allow for a quick and accurate assessment of the engine, transmission, and chassis, making them particularly relevant in conditions where diagnostic resources are limited.

AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

Traditionally, the unsteady motion of a car during acceleration or coasting is described using a differential equation:

$$\frac{dv}{dt} = j_a = \frac{P_p}{m_a \cdot \delta} = \frac{P_k - \Sigma P_c}{m_a \cdot \delta} \quad (1)$$

where P_p – is the force accelerating the vehicle;

P_{κ} – is the circumferential force on the drive wheels;
 ΣP_c – is the total resistance force to movement;
 m_a – is the mass of the vehicle with the load;
 δ – is the coefficient for taking into account rotating masses (the product $m_a \cdot \delta$ is the reduced mass of the vehicle).

$$P_{\kappa} = \frac{M_e \eta_{mp} i_{\kappa} i_0}{r_{\kappa}}; \quad \Sigma P_c = \pm P_i + P_f + P_w; \quad P_i = m_a g \cdot i; \quad P_f = m_a g \cdot f; \\ P_w = 0,5 \rho C_x F \cdot v^2 \quad (2)$$

where M_e – is the effective engine torque, Nm;
 η_{tr} – is the transmission efficiency;
 i_{κ}, i_0 – are the gear ratios of the transmission and final drive;
 r_{κ} – is the dynamic radius of the wheel, m;
 P_i, P_f, P_w – are the downward rolling resistance, rolling resistance, and air resistance, respectively, in N;
 g – is the acceleration due to gravity, 9.81 m/s²;
 i – is the slope;
 f – is the rolling resistance coefficient;
 ρ – is the air density, kg/m³;
 C_x – is the aerodynamic drag coefficient;
 F – is the frontal area of the vehicle, m²;
 v is the speed, m/s.

RESEARCH RESULTS

The process of simulating the unsteady motion of a vehicle on a roller rig is described in a virtually identical manner. The fundamental difference is that in this case, it's not the vehicle itself that accelerates, but the rig's rollers, which are connected to the flywheels and other rotating masses. The system is subject to a different type of resistance than when the vehicle is moving on the road.

Differential equation (1), which describes the dynamics of such a process, is solved relatively simply in cases where all its parameters and functions depend on velocity to a power of no greater than two. After combining the coefficients for equal powers of velocity and dividing the resulting expression by the total reduced mass of the system, the equation can be represented in the following form:

$$\frac{dv}{dt} + Av^2 + Bv + C = 0 \quad \text{or} \quad \frac{dv}{Av^2 + Bv + C} = -dt.$$

The integral of the right side is $-t$. The integral of the left side:

$$\int \frac{dv}{Av^2 + Bv + C} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \ln \left| \frac{2Av + B - \sqrt{-\Delta}}{2Av + B + \sqrt{-\Delta}} \right|,$$

Where $\Delta = 4AC - B^2$, and $\Delta < 0$.

$$t = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \left(\ln \left| \frac{2Av_2 + B - \sqrt{-\Delta}}{2Av_2 + B + \sqrt{-\Delta}} \right| - \ln \left| \frac{2Av_1 + B - \sqrt{-\Delta}}{2Av_1 + B + \sqrt{-\Delta}} \right| \right) \quad (3)$$

If $\Delta > 0$, then

$$t = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \left(\operatorname{arctg} \frac{2Av_2 + B}{\sqrt{\Delta}} - \operatorname{arctg} \frac{2Av_1 + B}{\sqrt{\Delta}} \right) \quad (4)$$

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

This method ensures satisfactory agreement between calculated data and experimental results in cases where the dependence of engine torque on engine speed can be accurately approximated by a square parabola. However, even for carbureted engines, such a simplified description of the torque characteristic is only a rough approximation and does not always yield reliable results.

In situations where the differential equation of dynamics includes third-degree terms, E. A. Belogurov [2] proposed the following general solution:

$$t = \left(\frac{\ln(v_1 - y_1)}{\ln(v_2 - y_1)} \right) + \frac{B_1}{2} \left(\frac{\ln|v_1^2 + pv_1 + q|}{\ln|v_2^2 + pv_2 + q|} \right) + \left(C_1 - \frac{B_1 p}{2} \right) \frac{2}{\sqrt{4q - p^2}} \left(\operatorname{arctg} \frac{2v_1 + p}{\sqrt{4q - p^2}} - \operatorname{arctg} \frac{2v_2 + p}{\sqrt{4q - p^2}} \right) \tag{5}$$

The resulting formula is already significantly cumbersome and inconvenient for practical application. Meanwhile, for modern injection engines with electronic control systems, the dependence of torque on crankshaft speed is becoming increasingly complex. In such cases, the torque curve is described not by simple second- or third-degree polynomials, but by expressions of the fourth to sixth degree, or even by several functions with a piecewise approximation (Fig. 1). A similar situation is observed for driving resistances, which also have a complex nonlinear dependence on vehicle speed.

With such a complex nature of parameter changes, the use of labor-intensive analytical approximations and subsequent integration of cumbersome expressions becomes pointless. This approach requires significant computational effort and does not guarantee high accuracy, since the original dependences are still only an approximate description of real processes. The result is only a rough estimate of the desired quantities, not their reliable values, which reduces the practical value of the obtained results.

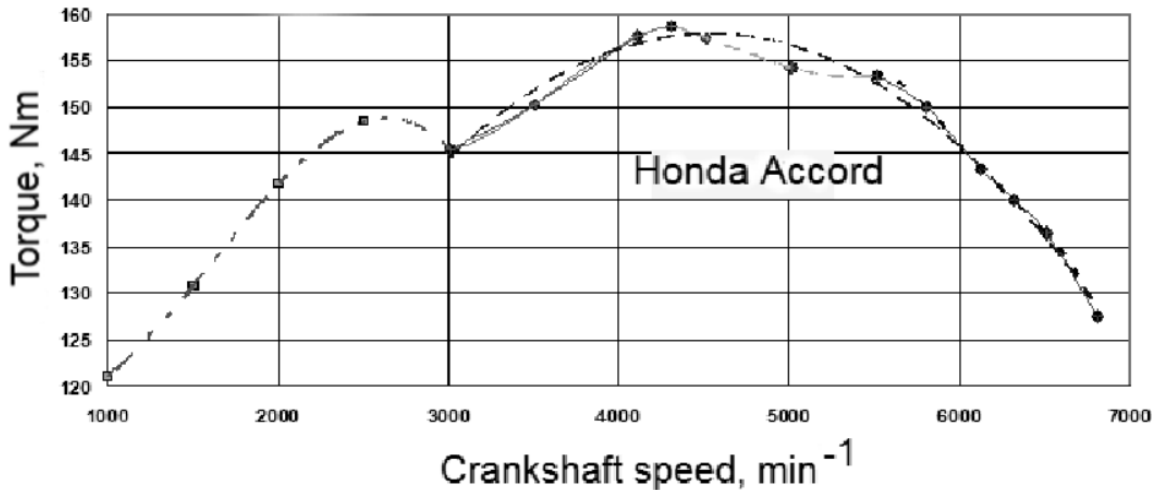


Fig. 1. Torque on the drive wheels of the Honda Accord [3].

Table 1
Piecewise approximation of characteristic sections of the torque curve at the drive wheels of a Honda Accord

Speed range	Approximation formula
From 1000 to 3009	$y = -7,1602 \cdot 10^{-9}x^3 + 3,4648 \cdot 10^{-5}x^2 - 3,3273 \cdot 10^{-2}x + 126,88$
From 3009 to 6806	$y = -5,7073 \cdot 10^{-6}x^2 + 5,1800 \cdot 10^{-2}x + 40,369$
From 3009 to 4311	$y = -8,0338 \cdot 10^{-9}x^3 + 8,7483 \cdot 10^{-5}x^2 - 3,0390 \cdot 10^{-1}x + 486,63$
From 4311 to 5518	$y = 4,0051 \cdot 10^{-9}x^3 - 5,5474 \cdot 10^{-5}x^2 + 2,4920 \cdot 10^{-1}x - 205,54$
From 5518 to 6806	$y = -3,1948 \cdot 10^{-11}x^4 + 7,8463 \cdot 10^{-7}x^3 - 7,2183 \cdot 10^{-3}x^2 + 29,461x - 44839$

Validation of Numerical Methods. Numerical methods for solving vehicle dynamics problems are well known and widely used in practice. The examples below examine real-world cases of vehicle diagnostics, particularly when testing their traction characteristics. The main goal of such diagnostic procedures is to determine the actual engine torque as a fraction of its nominal value. This fraction is determined by comparing the calculated vehicle acceleration time with the experimentally measured one.

The purpose of this analysis is to evaluate the accuracy of the numerical method—specifically, to identify and quantify two error components: the error associated with the numerical solution of the differential equation and the error caused by the approximation of the initial relationships.

Example 1. It is necessary to evaluate methods for calculating the acceleration time of a Honda Accord on a road section from 60 to 100 km/h (the so-called elasticity test). During field tests conducted by Autoreview magazine [4], the car demonstrated an acceleration time of 6.7 seconds in Drive mode.

The torque at the vehicle's drive wheels, i.e., the torque measured by the engine's external speed characteristic (ESC) minus transmission losses, is shown in Figure 1. Figure 2 shows the automatic transmission (AT) gear shift sequence during acceleration. The graph shows that acceleration from 60 to 100 km/h is accomplished in second gear, with the crankshaft speed range being from 3179 to 5298 min^{-1} .

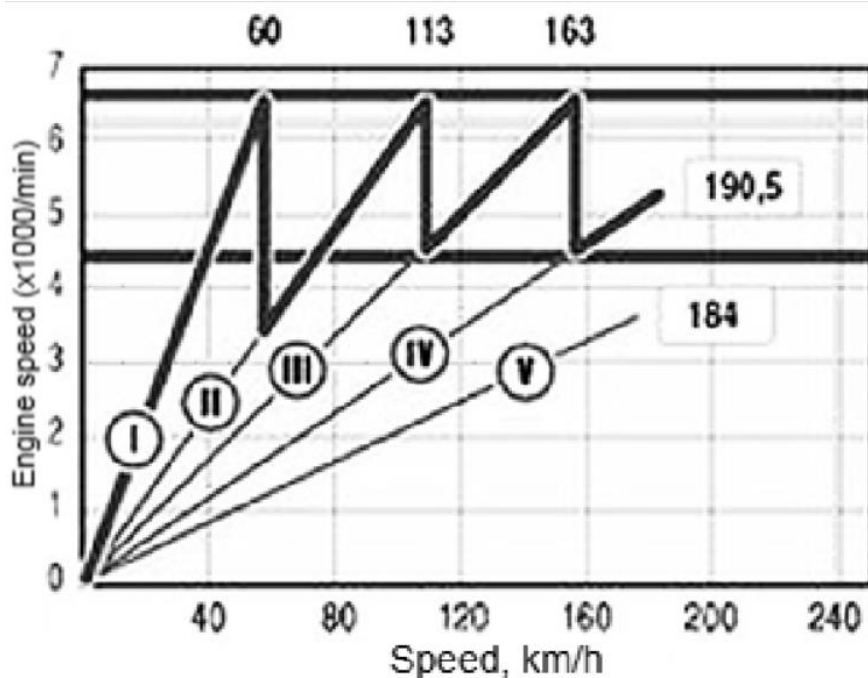


Fig. 2. Acceleration graph of the Honda Accord [4]

The vehicle's final drive ratio is $i_0 = 4.437$. Goodyear UG 500 205/55 R16 tires have a dynamic radius $r_{\square} = 0.307$ m. These tires are classified as ECO in terms of rolling resistance [5].

The vehicle's unladen weight, determined based on weighing results at the test site, is 1,280 kg. Since information on the actual load is unavailable, the minimum standard load for a passenger car of 180 kg, is assumed in the calculations. Therefore, the total vehicle weight, including the driver, passengers, and measuring equipment, is $m_a = 1,460$ kg.

The reduced mass of the rotating wheels is 43 kg, and that of the driven transmission elements is 6.4 kg (determined experimentally using the bifilar suspension and coasting methods). The calculated effective mass of the engine and transmission in second gear is 149 kg. Consequently, the total effective mass of the vehicle during acceleration is 1,658 kg.

The manufacturer's stated aerodynamic drag coefficient is $C_x = 0.31$ [6]. However, according to the results of processing the experimental coastdown data, performed using the methodology [5] based on tests conducted by Autoreview magazine, the actual value of the coefficient was $C_x = 0.381$.

Vehicle frontal area (calculated):

$$F = 0,84 \cdot B \cdot H$$

where B, H are the width and height of the vehicle, respectively, in m.

$$F = 0,84 \cdot 1,715 \cdot 1,44 = 2,074 \text{ M}^2$$

The air density on the day of the Autoreview experiment is unknown. Therefore, the standard average value commonly used in similar problems, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, was adopted in the calculations.

The dependence of the torque on the drive wheels on the crankshaft speed in the range of 3000–6800 min^{-1} is shown in Figure 1 (dashed line, second line of the caption). For this frequency range, this dependence is approximated by the following equation:

$$M_e = -5,71 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 5,18 \cdot 10^{-2} n + 40,4. \quad (6)$$

Substituting (5) into (2), we obtain the dependence of the traction force on the torque; in numbers for the 2nd gear:

$$P_\kappa = \frac{M_e \cdot 1,534 \cdot 3,945}{0,303} = M_e \cdot 17,8 = -1,140 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 1,035 \cdot n + 806. \quad (7)$$

Further calculations will become more convenient if we switch from crankshaft revolutions to vehicle speed in m/s:

$$n = 9,55 \frac{v \cdot i_k \cdot i_0}{r_k} = 9,55 \frac{v \cdot 1,534 \cdot 3,945}{0,303} \approx 191v. \quad (8)$$

Then the dependence of the traction force on the speed will take the form

$$P_\kappa = -4,15 \cdot v^2 + 197 \cdot v + 806. \quad (9)$$

The equation for the dependence of air resistance on speed:

$$P_w = 0,5 \rho C_x F \cdot v^2 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,38 \cdot 2,074 \cdot v^2 = 0,473v^2 \quad (10)$$

Based on the vehicle coasting [4], the rolling resistance coefficient $f = 0.0122$ was calculated for a speed of 6.6 m/s (23.75 km/h), therefore the $f(v)$ dependence was adopted according to the upper curve for ECO tires [7], which gives a close value of 0.01238 for this speed:

$$f(v) = 1,36 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 7,54 \cdot 10^{-6} \cdot v + 0,01248 \quad (11)$$

Coefficient that takes into account the reduction in rolling resistance when tires are not fully loaded (at $G_{\max} = 615 \text{ kg}$ for tires with index 91):

$$K_G = 1,3 - 0,3 \cdot 4 \cdot G_{\max} / m_a = 1,3 - 0,3 \cdot 4 \cdot 615 / 1460 \approx 0,80 \quad (12)$$

Then the dependence of the rolling resistance force on speed:

$$P_f = m_a g \cdot f(v) \cdot K_G = 2,73 \cdot 10^2 \cdot v^2 - 0,471 \cdot v + 152. \quad (13)$$

The force accelerating the car:

$$P_p = P_\kappa - \Sigma P_c = -4,11 \cdot v^2 + 176v + 565. \quad (14)$$

The equation of motion of a car during acceleration:

$$\frac{dv}{dt} = j_a = -2,19 \cdot 10^{-3} v^2 + 9,39 \cdot 10^{-2} v + 3,22 \cdot 10^{-1} . \quad (15)$$

The solution using formula (3) yielded a time value of 6.6996321 s, which is closest to the 6.7 s measured in the test, with the engine torque reduced to 89.4%. The results of the numerical calculations are shown in Table 2.

Table 2

Results of calculating acceleration times from 60 to 100 km/h using a numerical method with different speed increments

Step, km/h	Time from 60 to 100 km/h	Absolute calculation error Δt , s	Relative error of calculation ε , %
By solving the differential equation	6,6996321	0	0
0,5	6,699673	$4,072 \cdot 10^{-5}$	0,000608
1	6,699795	0,000163	0,002432
2	6,700284	0,000652	0,009733
5	6,703712668	0,004081	0,060907
10	6,716027314	0,016395214	0,244718124
20	6,766356427	0,066724327	0,995940172

As the table shows, even at a 10 km/h increment, the numerical calculation result deviates from the differential equation solution by less than 0.02 s. This is a relatively small error, as acceleration time is typically measured to the first decimal place. Therefore, using a numerical calculation instead of a general solution to the differential equation is acceptable.

In the example shown, the diagnosis was: torque is reduced to 0.894 of the nominal value. This value is excessively low for a practically new car, too close to the maximum of 0.85. It is possible that the diagnosis is incorrect, caused by an excessively rough approximation of the section of the torque curve from 3000 to 6800 min⁻¹. To estimate the error caused by the approximation, the torque characteristic was represented as a piecewise smooth curve, broken down into characteristic sections, and approximated by polynomials of degrees 3–4 (Fig. 1). The acceleration calculation was performed in 5 km/h increments – as shown in Table 1, this yields an error of less than 0.1%. The calculated acceleration time at a torque of 0.894 was 7.04 s (versus 6.7 s for the general approximation of the 3000...6800 min⁻¹ section). A discrepancy of 0.34 s is 80 times greater than the error of the numerical method of 0.00408 s.

The diagnosis made using the piecewise approximation is 93.3% of the nominal value. Since the car is new, this is a more probable estimate.

A more refined solution in general would require solving three differential equations for three sections, where the dependencies are described by polynomials of degrees 3 and 4, and the integrals are not reducible to tabular ones. Under these conditions, the numerical method should be considered more rational.

Example 2. Evaluate methods for calculating the acceleration time in fourth gear ($i_k = 1.031$) for the drive wheels of a Hyundai Accent vehicle using the PDS KHADII test rig (certified by the Institute of Metrology, certificate No. 100-2151/2006). In our experiment, the average acceleration time from 50 to 70 km/h was 1.60 s with a load (additional resistance) of $P_H = 600$ N created by the rig's hydraulic brake.

The engine's maximum torque curve is shown in Fig. 3. The actual torque as a percentage of the nominal torque is $K_m = 0.9835$ (our measurement on the rig in steady-state mode). The final drive ratio is $i_0 = 4.412$. We will adopt the efficiency of the mechanical transmission as $\eta_{tp} = 0.92$. The dynamic radius of Fulda Montero 2 195/65 R15 91T tires on a working roller with a diameter of 0.24 m is $r_d = 0.295$ m. The load on the drive wheels, taking into account the operator's weight, is 800 kg. The reduced mass of the rig is 200 kg (included in the design, verified using the drop weight method). The reduced mass of the two drive wheels and the driven part of the transmission is 27.5 kg (our measurements). The calculated reduced mass of the engine with the driving part of the transmission in 4th gear is 61.8 kg. Total reduced mass of the system $m_{pr.s} = 289.3$ kg.

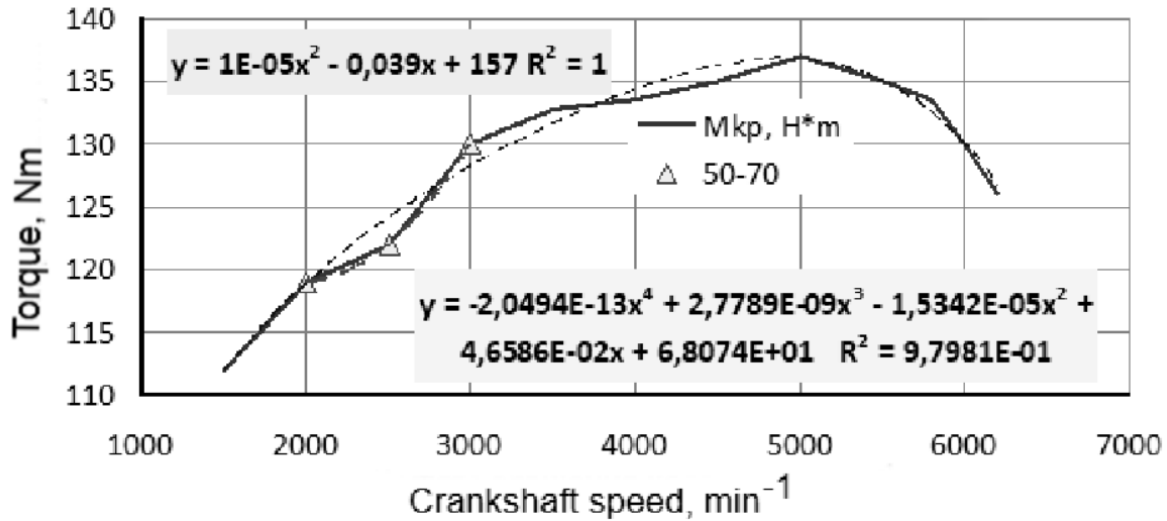


Fig. 3. External speed characteristics of the Hyundai Accent 1.4 petrol engine [8]

The generally accepted range for testing traction properties from 50 to 70 km/h corresponds to speeds from 2045 to 2863 min⁻¹. This section is marked in Fig. 3 with triangular markers and is approximated by a second-degree polynomial.

$$M_e = 1 \cdot 10^{-5} n^2 - 3,9 \cdot 10^{-2} n + 157 \tag{16}$$

Traction force on this section in 4th gear:

$$P_k = \frac{M_e \cdot i_k \cdot i_0 \cdot \eta_{mp}}{r_d} \cdot K_m = \frac{M_e \cdot 1,031 \cdot 4,412 \cdot 0,92}{0,295} \cdot 0,9835 =$$

$$= M_e \cdot 13,95 = 1,372 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 0,535n + 2154. \tag{17}$$

Relationship between the crankshaft rotation speed and the linear speed of the wheel contact with the rollers in m/s:

$$n_{eng} = 9,55 \frac{v \cdot i_k \cdot i_0}{r_d} = 9,55 \frac{v \cdot 1,031 \cdot 4,412}{0,295} \approx 147v. \tag{18}$$

Traction force versus speed:

$$P_k = 2,975 \cdot v^2 - 78,8 \cdot v + 2154. \tag{19}$$

The dependence of the total resistance force to rotation of the wheels and rollers of the stand on the speed (our measurement):

$$P_\Sigma = 0,460 \cdot v^2 - 8,98 \cdot v + 404. \tag{20}$$

Accelerating force:

$$P_p = P_k - P_\Sigma - P_H = 2,515 \cdot v^2 - 69,8 \cdot v + 1150. \tag{21}$$

The acceleration equation for a system with reduced mass $m_{pr.s} = 289.3$ kg:

$$\frac{dv}{dt} = j_a = 8,693 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 - 2 \cdot 0,1206 \cdot v + 5,06. \quad (22)$$

Here $\Delta > 0$, and the solution using formula (4) yielded an acceleration time from 50 to 70 km/h of 1.6009506 s. The results of the numerical calculation are shown in Table 3.

Table 3 Results of calculating acceleration time from 50 to 70 km/h using a numerical method with different speed increments

Step, km/h	Time from 50 to 70 km/h	Absolute calculation error Δt , s	Relative error of calculation ε , %
By solving the differential equation	1,600951	0	0
1	1,600897	-0,00005	-0,0034
2	1,600734	-0,00022	-0,0135
5	1,599599	-0,00135	-0,0844
10	1,595568	-0,00538	-0,3362

An attempt to apply a general approximation of the torque curve to this example using a fourth-degree polynomial (Fig. 3) yielded a clearly erroneous result of 2.2 s.

In both examples, the acceleration was described by a second-degree polynomial. If we analyze more complex cases, using fourth- to sixth-degree polynomials, the general solution will be cumbersome and difficult to use, and the numerical method will be the only viable solution.

CONCLUSIONS

The numerical method can yield negligible errors even with a fairly coarse partitioning of the range into intervals.

The error caused by a generalized approximation can be excessively large, so it is better to use a piecewise approximation.

REFERENCES

1. Belogurov E.A. Dinamicheskie metody diagnostirovaniya avtomobilja v dorozhnyh uslovijah: avtoref. dis. na soisk. uchen. stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.22.20 «Ekspluatacija i remont sredstv transporta» / E.A. Belogurov. – Kharkov, 2011. – 23 s.
2. Ukrainskij avtopark nachal staret' i rzhavet' / MIGnews.com.ua 30.10.2012 // 11:57 / [Internet resource] / Article access mode: <http://mignews.com.ua/ua/articles/123698.html>.
3. Rototest Research Institute. Powertrain Performance Graphs. [Internet resource] Article access mode: <http://www.rri.se/index.php?DN=29/performancegraphs>
4. Cyplenkov Ja. Jepoha peremen / Ja. Cyplenkov., L. Golovanov // Avtorevju. – 2007. – № 8 (379)
5. 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.
6. Automobile drag coefficient. Wikipedia / [Internet resource] / Article access mode : http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient
7. 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/
8. Informacija o dvigateljah, primenjaemyh v Hyundai / [Internet resource] / Article access mode : <http://www.hyundaiinfo.ru/info/engine.html>

Ю.В. Зибцев, П.А. Ворошилов, І.М. Шeverдін. Експериментальна оцінка методів розрахунку часу розгону транспортного засобу

У статті показано, що розвиток автомобілів неминує призводить до різкого зростання складності математичного опису їхнього руху. Сучасні транспортні засоби – це складні технічні системи, що складаються з численних взаємопов'язаних компонентів та підсистем – електронних, механічних, гідравлічних та пневматичних – кожна з яких впливає на загальні динамічні властивості транспортного засобу. Отже, використання простих аналітичних співвідношень стає неефективним:

вони не повністю враховують реальні фізичні процеси, що відбуваються під час розгону, гальмування, перемикання передач або зміни дорожніх умов. Для розрахунку норм часу розгону під час діагностики транспортного засобу доцільно використовувати числові методи, що дозволяють враховувати велику кількість параметрів, включаючи потужність і крутний момент двигуна, характеристики трансмісії, опір повітря та коченню, розподіл маси та стан дорожнього покриття. Такі методи забезпечують необхідну точність незалежно від складності математичної моделі та дозволяють описувати нелінійні процеси, перехідні режими та випадкові відхилення параметрів.

Використання числових моделей також відкриває широкі можливості для проведення віртуальних випробувань та попереднього прогнозування характеристик транспортних засобів без необхідності проведення дорогих натуральних експериментів. Це особливо важливо при розробці автоматичних діагностичних систем, які можуть аналізувати робочі параметри агрегатів у режимі реального часу та виявляти відхилення від норми. Крім того, числові методи дозволяють оптимізувати конструкцію транспортного засобу на етапі проектування, вибирати оптимальні режими роботи двигуна та трансмісії, зменшувати витрату палива та підвищувати безпеку руху. Ідеї, представлені в статті, підтверджуються розрахунками на конкретних прикладах та порівнянням отриманих результатів з експериментальними даними, що демонструє обґрунтованість та практичну застосовність запропонованого підходу. Результати цієї роботи можуть бути використані при розробці інтелектуальних систем технічного керування, моделюванні динаміки транспортних засобів та вдосконаленні методів оцінки їхньої продуктивності.

Ключові слова: автомобіль, колесо, прискорення, розрахунок, числові методи, дискретизація, крок, Hyundai Accent, Honda Accord.

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.

ШЕВЕРДІН Ігор Миколайович, приватний підприємець, e-mail: s9412239@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.

Igor SHEVERDIN, self employed, e-mail: s9412239@gmail.com.

Дата надходження статті до видання: 23.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1915

Баранов І.О. Баранський М.Б. Швець С.Е.
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро. Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДОСТАВКИ МАЛИХ ПАРТІЙ ВАНТАЖІВ

У статті досліджено методи керування оперативним плануванням вантажних автомобільних перевезень з особливим акцентом на організації доставки малих партій вантажів на основі логістичних принципів. Проаналізовано загальні виклики оперативного планування, такі як динамічність ринку та невизначеність умов, а також специфічні проблеми перевезень малих партій: низьке завантаження, порожні пробіги, складність маршрутизації великої кількості точок [1; 2]. Розглянуто та порівняно класичні й сучасні методи планування (точні, евристичні, метаевристичні, імітаційні, методи ШІ) за критеріями якості рішень, швидкодії та гнучкості [3; 4; 5]. Запропоновано структурну модель мережі консолідації для малих партій та математичну модель оптимізації маршрутизації, що враховує витрати, час, коефіцієнти завантаження та часові вікна [6; 7]. Розглянуто евристичний алгоритм для практичної реалізації моделі, що включає класифікацію замовлень, консолідацію партій та методи маршрутизації (Clarke-Wright, 2-opt). Проаналізовано можливості інтеграції методів планування з сучасними ІТ (GPS, TMS) [8; 9]. Наведено приклад розрахунку та оцінку економічної ефективності запропонованого підходу для регіональної мережі. Надано рекомендації щодо вибору методів та впровадження логістичних принципів для підвищення ефективності оперативного планування перевезень, особливо малих партій, в умовах України.

Ключові слова: оперативне планування, вантажні автомобільні перевезення, малі партії вантажів, консолідація, логістика, методи керування, оптимізація маршрутів, математична модель, ефективність, TMS.

ВСТУП

Вантажні автомобільні перевезення є ключовою ланкою сучасних ланцюгів постачання, забезпечуючи гнучкість та доступність доставки товарів [1]. Ефективність транспортно-логістичної системи безпосередньо впливає на конкурентоспроможність бізнесу та економіку загалом. Особливу роль відіграє оперативне планування (горизонт від кількох годин до доби), яке включає призначення транспортних засобів (ТЗ), формування маршрутів, складання графіків та реагування на збої [2; 3].

Сучасний ринок характеризується високою динамічністю, невизначеністю (зміни попиту, дорожньої обстановки, умов доставки) та жорсткими вимогами до сервісу [4]. Традиційні методи планування, що покладаються на досвід диспетчера, стають неефективними. Особливо гостро це проявляється при організації перевезень малих партій вантажів (МПВ), значущість яких зростає через розвиток e-commerce та збільшення частки малого бізнесу [5]. Типові логістичні схеми, орієнтовані на великі партії, при роботі з МПВ призводять до високої частки порожніх пробігів [6; 10], низького заповнення ТЗ, складності планування при великій кількості точок доставки та потреби у швидкій обробці на терміналах. Ці виклики вимагають пошуку компромісу між швидкістю та економічністю шляхом застосування логістичних принципів: консолідації вантажів, оптимізації маршрутів та цифрової координації.

Виникає потреба у розробці та впровадженні науково обґрунтованих, адаптивних методів керування оперативним плануванням, які б дозволили ефективно використовувати ресурси, мінімізувати витрати та гнучко реагувати на зміни, особливо при роботі з МПВ в умовах логістичної інфраструктури України.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблематика оперативного планування та маршрутизації транспорту досліджується давно. Класичні задачі TSP та VRP з різними обмеженнями є основою багатьох методів. Для їх розв'язання використовують:

• **Точні методи оптимізації** (математичне програмування, метод гілок та меж), що гарантують оптимальність, але мають високу обчислювальну складність для реальних задач.

• **Евристичні методи** (конструктивні, наприклад, метод найближчого сусіда, алгоритм Кларка-Райта (savings), та ітераційні, наприклад, 2-opt, 3-opt), які швидко дають наближені розв'язки.

• **Метаевристичні методи** (генетичні алгоритми, імітація відпалу, мурашині алгоритми), що забезпечують кращу якість рішень для складних задач порівняно з простими евристичними.

•**Імітаційне моделювання** для оцінки стратегій в динамічних та стохастичних умовах.

•**Методи на основі штучного інтелекту (ШІ)** (експертні системи, машинне навчання, агентні системи) для прогнозування та адаптивного планування [4-9].

Також для аналізу транспортних потоків та роботи терміналів застосовуються моделі систем масового обслуговування. Праці розглядають логістичні системи та організацію міжнародних перевезень [11-14]. Дослідження присвячені аналізу транспортних систем та моделюванню.

Незважаючи на велику кількість методів, багато досліджень фокусуються на великих потоках або теоретичних моделях, не завжди застосовних до специфіки регіональних перевезень МПВ. Бракує порівняльного аналізу ефективності методів саме в умовах оперативного планування МПВ та рекомендацій щодо їх інтеграції з сучасними ІТ [8; 9; 16].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є дослідження та порівняльний аналіз методів керування оперативним плануванням, розробка та оцінка математичної логістичної моделі для оптимізації автомобільних перевезень малих партій вантажів шляхом консолідації та ефективної маршрутизації [1; 2].

Завдання:

1. Систематизувати та проаналізувати існуючі методи оперативного планування, визначити їх переваги та недоліки.

2. Визначити критерії для порівняння ефективності методів.

3. Побудувати структурну модель мережі консолідації для МПВ.

4. Формалізувати математичну модель (цільову функцію та обмеження) для оптимізації маршрутизації МПВ.

5. Розробити евристичний алгоритм для практичної реалізації моделі.

6. Розглянути інтеграцію методів планування з ІТ.

7. Провести прикладний розрахунок та оцінити економічну ефективність моделі.

8. Надати рекомендації щодо вибору та застосування методів для транспортних компаній України.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ

Методи керування оперативним плануванням класифікують за підходом до пошуку рішення (оптимізаційні, імітаційні, на основі ШІ) та за врахуванням динаміки (статичні, динамічні/адаптивні).

•**Точні методи** : Гарантують оптимальність, але обчислювально складні для великих та динамічних задач. Використовуються для невеликих парків або як еталон.

•**Евристичні методи** : Швидкі та прості, але не гарантують оптимальності, погано працюють зі складними обмеженнями. Застосовуються для швидкого формування планів або як частина метаевристик.

•**Метаевристичні методи** : Знаходять якісні рішення для складних задач за прийнятний час, адаптуються до динаміки та обмежень. Вимагають налаштування параметрів. Основний інструмент сучасних TMS, підходять для динамічної маршрутизації.

•**Імітаційне моделювання** : Аналізує складні системи з урахуванням випадковості, дозволяє тестувати сценарії. Не є оптимізаційним методом. Використовується для оцінки правил диспетчеризації, аналізу пропускнуої спроможності.

•**Методи на основі ШІ** : Навчаються на даних, роблять прогнози, дозволяють створювати адаптивні системи. Потребують багато даних, складні в інтерпретації та реалізації. Застосовуються для прогнозування, динамічного коригування, підтримки рішень [3; 4].

Порівняльна характеристика наведена в Таблиці 1.

2. ЛОГІСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ МАЛИХ ПАРТІЙ ВАНТАЖІВ (МПВ)

Ключовим принципом підвищення ефективності перевезень МПВ є **консолідація** – об'єднання дрібних відправлень у більші партії для подальшого транспортування магістральним транспортом між терміналами (хабами) та подальшої "розукуплення" для доставки "останньої милі".

2.1. СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ КОНСОЛІДАЦІЇ

Пропонується розглядати транспортну мережу як орієнтований граф $G(N,E)$, де N – множина вузлів (пункти відправлення S , пункти отримання D , консолідаційні хаби H), E – множина дуг (транспортні сполучення). Кожна дуга (i,j) характеризується довжиною L_{ij} ,

середньою швидкістю v_{ij} , вартістю перевезення C_{ij} . У вузлах відбувається обробка вантажів з часом t_i . Замовлення n мають обсяг q_n , вагові обмеження та часові вікна доставки $[a_n, b_n]$.

Структурна схема може включати кілька рівнів хабів (наприклад, центральний та регіональні) для оптимізації магістральних та місцевих перевезень [6; 10].

2.2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ (МПВ)

Завдання полягає у формуванні множини маршрутів R для транспортних засобів K , що обслуговують множину замовлень N , мінімізуючи сукупні витрати з урахуванням часу доставки та ефективності використання ТЗ.

Цільова функція:

$$\text{minimize } Z = \sum_{r \in R} \left(\sum_{(i,j) \in R} C_{ij} \cdot L_{ij} \cdot x_{ij}^r + \alpha \cdot T_r \right) + \beta \cdot \sum_{k \in K} \left(\frac{Q_k - \sum_{n \in N} r_k q_n}{Q_k} \right) \quad (1.1)$$

де: R – множина маршрутів;

(i, j) – дуга (від пункту i до пункту j);

C_{ij} – вартість перевезення по ділянці (i, j) ;

L_{ij} – відстань між пунктами i та j ;

x_{ij}^r – бінарна змінна (1, якщо дуга (i, j) входить у маршрут r ; 0 – інакше);

α – коефіцієнт вагомості часу (або штраф за затримку);

K – множина транспортних засобів;

Q_k – вантажопідйомність транспортного засобу k ;

q_n – вантаж, що перевозиться до пункту n ;

r_k – маршрут, закріплений за транспортним засобом k ;

β – коефіцієнт штрафу за невикористану місткість транспорту.

Система обмежень моделі:

1. Покриття замовлень:

Кожне замовлення n має бути включене рівно в один маршрут r .

$$\sum_{r \in R} y_n^r = 1, \quad \forall n \in N_{orders} \quad (1.2)$$

де $y_n^r = 1$, якщо замовлення n обслуговується маршрутом r .

2. Баланс потоків:

Для кожного вузла i у маршруті r кількість вхідних дуг дорівнює кількості вихідних (окрім початкового та кінцевого пунктів).

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^r = \sum_{j \in N} x_{ij}^r, \quad \forall i \in N, \forall r \in R \quad (1.3)$$

3. Обмеження місткості транспорту:

Загальна кількість вантажу на маршруті, який виконується транспортним засобом k , не перевищує його вантажопідйомності.

$$\sum_{n \in R} r_k q_n \leq Q_k, \quad \forall r, k \quad (1.4)$$

4. Часові вікна:

Час прибуття до кожного пункту має знаходитись у межах дозволеного інтервалу.

$$a_n \leq t_{arr,n} \leq b_n, \quad \forall n \in N_{orders} \quad (1.5)$$

5. Обмеження на максимальний час або довжину маршруту:

Загальний час (або довжина) маршруту не повинен перевищувати встановлений ліміт.

$$T_r \leq T_{max}, \quad \forall r \in R \quad (1.6)$$

Або

$$L_r \leq L_{max}, \quad \forall r \in R \quad (1.7)$$

6.Інші обмеження: Можуть включати сумісність вантажів, пріоритетність замовлень, обмеження робочого часу водіїв тощо [6; 7].

2.3. ЕВРЕСТИЧНИЙ АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ

Оскільки задача маршрутизації є NP-складною, для практичних розрахунків пропонується евристичний підхід:

1.Класифікація та кластеризація замовлень: Групування замовлень за географічною близькістю (наприклад, методом k-середніх або DBSCAN) та часовими вікнами.

2.Формування партій консолідації (Batching): Об'єднання замовлень з одного або близьких кластерів у партії, що не перевищують місткість ТЗ, з урахуванням сумісності вантажів та часових вікон.

3.Початкова маршрутизація: Побудова маршрутів для кожної партії або групи партій за допомогою конструктивної евристики, наприклад, аССислгоритму Кларка-Райта (savings), який об'єднує маршрути на основі економії пробігу.

4.Локальна оптимізація: Покращення побудованих маршрутів за допомогою ітераційних евристик, таких як 2-opt або 3-opt, що змінюють послідовність відвідування точок для зменшення довжини маршруту.

5.Розподіл маршрутів по ТЗ: Призначення готових маршрутів на доступні транспортні засоби з урахуванням їх характеристик та графіків роботи.

6.Симуляція та корекція (за потреби): Перевірка реалістичності плану за допомогою імітаційного моделювання та можливість його коригування в режимі реального часу при надходженні нових даних [7; 8].

3. ІНТЕГРАЦІЯ З ІНФОРМАЦІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Сучасні ІТ є невід'ємною частиною ефективного оперативного планування:

•**TMS:** Централізована платформа для управління всіма процесами: прийом замовлень, планування (часто з вбудованими евристичними/метаевристичними), моніторинг, аналітика. Важлива для координації консолідації МПВ.

•**GPS-моніторинг:** Надає дані про реальне місцезнаходження ТЗ, швидкість, пробіг, дозволяючи відстежувати виконання плану та оперативно реагувати на відхилення.

•**ITS та сервіси прогнозування трафіку:** Дозволяють отримувати актуальну інформацію про дорожню ситуацію для більш точного розрахунку часу руху та коригування маршрутів.

•**Мобільні додатки для водіїв:** Забезпечують зв'язок, передачу завдань, навігацію, підтвердження доставки (Proof of Delivery - POD), що важливо при великій кількості точок у маршрутах МПВ.

•**EDI та API:** Автоматизують обмін даними з клієнтами та партнерами (статуси замовлень, документи), прискорюючи процеси та зменшуючи помилки.

Інтеграція цих технологій дозволяє реалізувати динамічне (адаптивне) планування, що є критично важливим для ефективного управління перевезеннями МПВ.

4. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Розглянемо умовний приклад регіональної мережі з трьома хабами (Н1, Н2, Н3) та щоденним потоком МПВ. Вхідні дані (кількість замовлень, середній обсяг, тарифи, швидкість, час обробки) наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Вхідні дані (умовно)

Показник	Н1	Н2	Н3	Одиниця
Щоденна кількість замовлень	120	80	60	шт.
Середній об'єм на замовлення	0.08	0.06	0.07	м ³
Час обробки на хабі	0.25	0.20	0.22	год.
Тариф (грн/км)	6.5	6.2	6.8	грн
Середня швидкість (км/год)	45	42	40	км/год

Припустимо використання ТЗ місткістю 10 м³. Застосування запропонованого евристичного алгоритму (кластеризація, консолідація двічі на день, маршрутизація методом savings з локальною оптимізацією) дозволяє отримати такі результати (Таблиця 2 статті):

Таблиця 2. Результати моделювання

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна (%)
Середній час доставки, год	3.20	2.62	-18.10
Собівартість 1 доставки, грн	145.00	127.60	-12.00
Коефіцієнт використання автопарку	0.68	0.78	+14.70

- Зменшення середнього часу доставки на ~18%.
- Зниження собівартості однієї доставки на ~12%.
- Підвищення коефіцієнта використання автопарку на ~15%.

Економічний ефект: при щоденній кількості 260 замовлень та економії 17.4 грн на доставку, річна економія може скласти близько 1,13 млн грн. Це демонструє значний потенціал оптимізації перевезень МПВ на основі логістичних принципів.

5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ

Вибір методів та стратегій планування залежить від специфіки компанії.

•**Загальні рекомендації:** Впровадження централізованої TMS для збору даних та планування; визначення чітких правил та нормативів консолідації (мінімальний обсяг партії, часові рамки); використання GPS-моніторингу для контролю та динамічного коригування; регулярний аналіз ефективності маршрутів та KPI для диспетчерів і водіїв; навчання персоналу.

•**Вибір методів:** Для МПВ з великою кількістю точок та динамічними замовленнями перевагу слід віддавати **метаевристичним алгоритмам**, інтегрованим у TMS, що дозволяють швидко знаходити якісні рішення та адаптуватися до змін. **Евристики** (як savings) можуть використовуватися для початкового етапу. **Методи ШІ** є перспективними для прогнозування та автоматичного коригування. **Імітаційне моделювання** корисне для стратегічного аналізу та тестування правил [8; 9; 13; 14]

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати дослідження підтверджують доцільність використання логістичних принципів консолідації та евристичних методів маршрутизації під час оперативного планування перевезень малих партій вантажів. Запропонована математична модель забезпечує ефективний баланс між мінімізацією транспортних витрат, скороченням часу доставки та підвищенням коефіцієнта використання автопарку.

Порівняння результатів моделювання з даними класичних досліджень (Dantzig & Ramser, 1959; Laporte, 1992; Toth & Vigo, 2014) показує, що застосування комбінованого евристичного підходу (кластеризація, метод Кларка-Райта, 2-opt) дозволяє досягти прийнятної якості планів за значно менший час розрахунків, що є критичним для оперативних задач.

Умовний приклад показав, що після впровадження запропонованої моделі середній час доставки зменшився на 18 %, собівартість — на 12 %, а коефіцієнт використання автопарку зріс на 15 %. Такі показники свідчать про практичну реалізованість розробленого підходу та його економічну ефективність для транспортних підприємств, які працюють із малими партіями вантажів.

Разом із тим, модель має певні обмеження. Вона не враховує стохастичні зміни попиту, дорожньої ситуації та погодних умов, а також не оцінює ризики, пов'язані з непередбаченими затримками чи відмовами транспортних засобів. У подальшому доцільно адаптувати її до динамічних умов середовища за допомогою методів машинного навчання або імітаційного моделювання.

Таким чином, поставлені у статті **цілі та завдання виконані повністю**: здійснено аналіз існуючих методів, побудовано структурну та математичну модель, розроблено евристичний алгоритм

реалізації, проведено розрахунковий приклад і підтверджено економічну доцільність запропонованого підходу.

ВИСНОВКИ

1. Оперативне планування вантажних автоперевезень, особливо малих партій, є складною оптимізаційною задачею, що ускладнюється динамічністю ринку та невизначеністю умов. Перевезення МПВ мають специфічні проблеми (низьке завантаження, складність маршрутизації), що вимагають застосування логістичних принципів, зокрема консолідації.

2. Існує широкий спектр методів планування (точні, евристичні, метаевристичні, імітаційні, ШІ), вибір яких залежить від розмірності задачі, вимог до точності та швидкодії, динаміки процесу. Для оперативного планування МПВ найбільш доцільним є використання **метаевристичних та гібридних підходів**, що поєднують різні методи.

3. Запропонована математична модель та евристичний алгоритм, що включає консолідацію та оптимізацію маршрутів, дозволяють суттєво підвищити ефективність перевезень МПВ, знизити витрати та час доставки, покращити використання автопарку. Приклад розрахунку демонструє потенційну економічну ефективність підходу.

4. Інтеграція методів планування з сучасними інформаційними технологіями (TMS, GPS, ITS) є ключовим фактором для реалізації адаптивного керування та підвищення ефективності оперативного планування в реальному часі.

5. Для українських транспортних компаній впровадження науково обґрунтованих методів оперативного планування, логістичних принципів консолідації МПВ та сучасних ІТ є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку моделей, що враховують стохастичні фактори, інтеграцію з прогнозуванням попиту та автоматичну адаптацію параметрів у режимі реального часу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Крикавський Є. В. Логістика: основи теорії: Підручник / Є. В. Крикавський. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 416 с.
2. Макаренко М. В., Голембівська О. М., Якименко Н. В. Управління транспортними системами: Підручник. – К.: Логос, 2008. – 424 с.
3. Гаджинський А. М. Логістика: Підручник. – 20-е вид. – М.: Дашков і Ко, 2012. – 484 с.
4. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
5. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Siam.
6. Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, 59(3), 345-358.
7. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
8. Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 146). Springer Science & Business Media.
9. Figliozzi, M. A. (2010). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics: A case study in Portland, Oregon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 667-676.
10. Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management*. John Wiley & Sons.
11. Воркут А.І. Логістичні системи транспорту: монографія. – Київ, 2020.
12. Фомін О.В. та ін. Організація міжнародних перевезень: монографія. – 2019.
13. Prassas E.S., Roess P. *Transportation Systems Analysis*. – Springer, 2018.
14. Dutta M., Ahmed M.A. Calibration of VISSIM Models. – *Advances in Transportation Studies*, 2019.
15. Troelsen A., Japikse P. *Pro C# 7*. – Apress, 2017.
16. Методичні рекомендації з організації перевезень малих партій (2023).

REFERENCES

1. Krykavskiy, Ye. V. (2004). *Lohistyka: osnovy teorii* [Logistics: Fundamentals of Theory]. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika".

2. Makarenko, M. V., Golembivska, O. M., & Yakymenko, N. V. (2008). *Upravlinnia transportnyh systemamy* [Management of Transport Systems]. Kyiv: Logos.
3. Hadzhynskiy, A. M. (2012). *Lohistyka* [Logistics] (20th ed.). Moscow: Dashkov i Ko.
4. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
5. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*. Philadelphia: SIAM.
6. Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
7. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
8. Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (2nd ed.). New York: Springer.
9. Figliozzi, M. A. (2010). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.05.001>
10. Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
11. Vorkut, A. I. (2020). *Lohistychni systemy transportu* [Transport Logistics Systems]. Kyiv: NAU Publishing.
12. Fomin, O. V., Hrytsenko, I. V., & Kolomiets, V. P. (2019). *Orhanizatsiia mizhnarodnykh perevezhen* [Organization of International Transportations]. Kyiv: Znannia.
13. Prassas, E. S., & Roess, R. P. (2018). *Transportation systems analysis*. Cham: Springer.
14. Dutta, M., & Ahmed, M. A. (2019). Calibration of VISSIM models for mixed traffic conditions. *Advances in Transportation Studies*, 47(1), 35–42.
15. Troelsen, A., & Japikse, P. (2017). *Pro C# 7: With .NET and .NET Core*. New York: Apress.
16. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2023). *Metodychni rekomendatsii z orhanizatsii perevezhen malykh partii vantazhiv* [Methodological Recommendations on the Organization of Small Consignment Freight Transport]. Kyiv: MIU.

I. Baranov, M. Baranskyi, S. Shvets. Optimization of Operational Planning for Freight Road Transport Taking into Account the Specifics of Small Batch Delivery

The article investigates methods for managing the operational planning of freight road transport with a special focus on organizing the delivery of small cargo batches based on logistics principles. General challenges of operational planning, such as market dynamics and condition uncertainty, as well as specific problems of small batch transportation (low utilization, empty runs, complexity of routing numerous points), are analyzed. Classical and modern planning methods (exact, heuristic, metaheuristic, simulation, AI methods) are reviewed and compared based on criteria of solution quality, computational speed, and flexibility. A structural model of a consolidation network for small batches and a mathematical model for route optimization, considering costs, time, load factors, and time windows, are proposed. A heuristic algorithm for the practical implementation of the model, including order classification, batch consolidation, and routing methods (Clarke-Wright, 2-opt), is considered. The possibilities of integrating planning methods with modern IT (GPS, TMS) are analyzed. An example calculation and an assessment of the economic efficiency of the proposed approach for a regional network are provided. Recommendations are given for selecting methods and implementing logistics principles to improve the efficiency of operational transportation planning, especially for small batches, in the context of Ukraine.

Keywords: operational planning, freight road transport, small cargo batches, consolidation, logistics, management methods, route optimization, mathematical model, efficiency, TMS.

БАРАНОВ Ігор Олегович, кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: baranov_i_o@pstu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0973>

БАРАНСЬКИЙ Михайло Борисович, магістрант кафедри автомобільного транспорту, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: baranskyi_m_b@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-4748-6755>

ШВЕЦЬ Сергій Едуардович, магістрант кафедри автомобільного транспорту, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: shvets_s_e@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0004-0555-902X>

Ihor BARANOV, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: baranov_i_o@pstu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0973>

Mykhailo BARANSKYI, Master's student at the Department of Automotive Transport, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: baranskyi_m_b@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-4748-6755>

Serhii SHVETS, Master's student at the Department of Automotive Transport, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: shvets_s_e@students.pstu.edu, <https://orcid.org/0009-0004-0555-902X>

Дата надходження статті до видання: 18.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1916

Бодак М.В., Бодак В.І.
Луцький національний технічний університет

ВИДИ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЇ ТЯГОВОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Збільшення виробництва електромобілів (ЕМ) значною мірою залежить від надійності та безпеки основних вузлів та агрегатів. Одною з найдорожчих та небезпечних частин електромобіля є силова (тягова) електрична батарея. Найбільшого поширення набули літій-іонні батареї (Li-ion). Важливою характеристикою, що впливає на їхню безпеку, є продуктивність та термін служби. Ці показники батареї залежать від середньої робочої температури, яка повинна знаходитися в оптимальному діапазоні для запобігання ряду негативних явищ. Саме тому робота систем терморегулювання (СТР) акумуляторних блоків ЕМ є важливою для забезпечення коректного функціонування в будь-яких умовах навколишнього середовища та експлуатації.

Літій-іонні (Li-ion) батареї стали домінуючою технологією для автомобільної промисловості завдяки деяким унікальним особливостям, таких як висока потужність, ємність, здатність зберігання та велика кількість можливих перезарядок. Однак, в умовах глибокого розряду генерується велика кількість теплової енергії внаслідок окисно-відновних реакцій, і температура батареї надмірно та неконтрольовано зростає з можливим подальшим samozапаленням. Отже, необхідно розробити таку систему охолодження батареї, щоб запобігти пошкодженню елементів через високу робочу температуру. Виникають і інші проблеми, коли Li-ion батареї досягають температури, нижчої за оптимальні значення, наприклад, нездатність віддавати енергію або швидка деградація та зменшення ємності. Саме тому потрібна ефективна система, здатна розігріти пристрій для досягнення оптимального температурного діапазону, тобто система терморегулювання (СТР).

Ключові слова: електромобілі, терморегуляція, безпека, літій-іонна батарея, теплообмін, енергоефективність

ВСТУП

Батареї перетворюють хімічну енергію, що міститься в їхньому активному матеріалі, безпосередньо в електричну енергію через реакції окиснення та відновлення [1]. Батареї складаються з окремих елементів, з'єднаних послідовно та паралельно для досягнення бажаної номінальної потужності, напруги та струму. Під час нормальної роботи відбувається процес розряджання або процес заряджання.

При розряджанні батарея живить електричне обладнання, і хімічна енергія, що міститься в активному матеріалі, перетворюється на електричну енергію. При заряджанні батарея підключається до генератора (або електричної мережі), і вхідна електрична енергія перетворюється на хімічну енергію та накопичується в активному матеріалі.

Безпека, довговічність та продуктивність батареї значною мірою залежать від того, як вони розряджаються чи заряджаються.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Системи терморегулювання (СТР) Li-ion батареї ЕМ відіграють ключову роль у роботі силової батареї для запобігання негативних явищ, які можуть вплинути на безпеку, продуктивність та деградацію акумуляторного блоку.

Існують типові та нетипові умови, за яких середня температура акумуляторного блоку може неконтрольовано зростати, спричиняючи аномальні хімічні зміни, такі як розкладання електроліту, або реакції між електродами та електролітом. Під час типових циклів заряджання та розряджання тепло, що генерується при електрохімічній реакції підвищує температуру батареї.

Неконтрольоване підвищення температури батареї може відбуватись під час нетипових робочих умов при термічному розгоні (*thermal runaway*). Термічний розгін складається з екзотермічних ланцюгових реакцій усередині батареї, які спричиняють дестабілізацію та деградацію внутрішньої структури [2]. Це явище може виникнути внаслідок різних форм механічного, електричного та термічного впливу, що призводить до короткого замикання між електродами елемента батареї через вихід з ладу електроліту. Тепло, що генерується, впливає на сусідні елементи, які піддаються тому ж явищу. Ця ланцюгова реакція не тільки підвищує температуру акумуляторного блоку, але й виділяє багато легкозаймистих газів, які збільшують внутрішній тиск блоку та можуть спричинити вибух і пожежу силової установки ЕМ [2]. Згідно Peiyi Sun et al. [3], у 2018 році сталося понад п'ятнадцять пожеж різних марок електромобілів через виникнення процесу термічного розгону. Причини цих вибухів різні. Вони виникали під час руху, заряджання або паркування автомобілів. В інших випадках полум'я виникало після зіткнення, яке вплинуло на механічну

поведінку акумуляторного блоку, спричинивши вибух силової установки. Термічний розгін також може мати небезпечний ефект під час природних катастроф, таких як повінь. Електромобілі після цього стають непридатними для використання з міркувань безпеки.

Подібно до того, як неконтрольоване підвищення середньої температури впливає на продуктивність, неконтрольоване зниження температури батареї може зменшити електропровідність електроліту та дифузію літію. Це збільшує електричні та електрохімічні втрати. Це суттєво впливає на роботу електромобілів в тих країнах, де температура навколишнього середовища взимку часто опускається нижче 0°C. Ці втрати збільшуються при температурі нижче -20°C [5].

Процес неконтрольованого нагрівання батареї є більш небезпечним, ніж охолодження, оскільки виникають умови, за яких електромобіль не може відбирати енергію з акумуляторного блоку для активації СТР [5].

Контролювання нагрівання є важливим для запобігання процесу, відповідальному за зниження осаду літію (*lithium plating*). Це осад металевого літію на поверхні анода, виготовленого з графіту, за умов швидкого заряджання або низької температури [6]. Цей процес скорочує термін служби батареї та її здатність накопичувати та вивільняти енергію під час циклів заряджання та розряджання. Незважаючи на численні дослідження, проведені протягом багатьох років, на сьогодні механізм цього процесу не повністю вивчений [6].

Виходячи з цих міркувань, було визначено оптимальний діапазон, у якому повинна знаходитися робоча температура Li-ion батареї, щоб зменшити явища, які зменшують термін служби, безпеку та продуктивність батареї. Згідно з дослідженнями, проведеними Pesaran et al. [7], акумуляторні блоки Li-ion батареї EM не виявляють очевидних пошкоджень та деградації в оптимальному діапазоні між 15°C та 35°C. Загалом, прийнятний температурний діапазон Li-ion батареї ширший за цей діапазон і визначається між -20°C та 60°C. Ще одна характеристика пов'язана з внутрішньою температурою батареї. Важливо рівномірно керувати температурним полем акумуляторного блоку, щоб уникнути різких перепадів температур між елементами, які можуть спричинити небажаний внутрішній теплообмін. Різниця температур елементів в акумуляторному блоці не повинна перевищувати 5°C [8].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

За останні роки було розроблено декілька варіантів СТР, різних за принципом роботи та конструкцією. До встановлених технологій, розроблених протягом років, належать:

- Повітряні СТР;
- Рідинні СТР ;
- СТР на основі холодоагенту;
- СТР на основі матеріалів зі зміною фазового стану (МЗФС);
- СТР на основі теплових труб (ТТ).

Перші три згадані методи є активними СТР, оскільки для роботи їм потрібна електрична енергія, тоді як останні два є пасивними СТР, оскільки вони не потребують жодного джерела електричної енергії. Комбінація хоча б двох із цих систем утворює гібридну систему терморегулювання (ГСТР).

Основна ціль даної статті є аналіз ключових відмінностей між наведеними варіантами СТР.

В задачі дослідження входили аналіз

принципу роботи кожної з систем, аналіз переваг та недоліків запропонованих СТР.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Повітряні СТР широко використовуються в EM, оскільки вони мають просту структуру, високу надійність, низьку вартість та просте обслуговування. Ці характеристики досягаються завдяки простій схемі установки, що вимагає менше обладнання, ніж інші методи. Основною особливістю повітряних СТР є використання повітря як робочої речовини. Однією з переваг цих систем з точки зору безпеки та впливу на навколишнє середовище є те, що повітря не токсичне та не займає. Існує кілька класифікацій цих систем щодо того, як повітря протікає через мережу труб і як воно обробляється для досягнення бажаної температури акумуляторного блоку. Перша відмінність полягає в наступному:

- Системи примусової конвекції: потік повітря в контурі генерується електричним вентилятором. Ця система вимагає певної кількості електричної енергії через потребу електричного двигуна вентилятора;

• Системи природної конвекції: потік повітря забезпечується рухом транспортного засобу, і вентилятор не потрібен. Щоб зменшити перепади тиску повітря, вирішальне значення має конструкція повітряпроводів та форм.

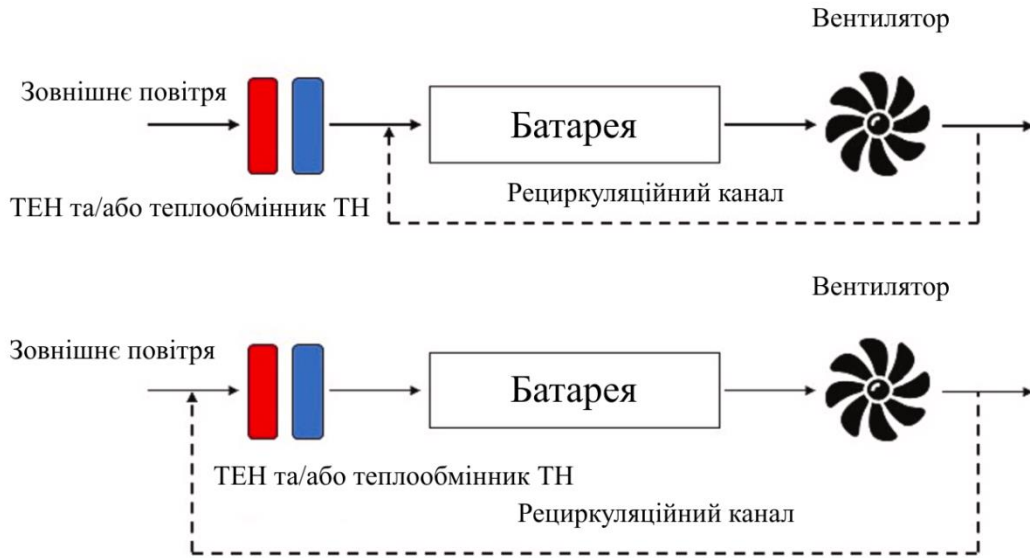


Рисунок 1 – Схема роботи повітряних систем терморегуляції батареї

Друга відмінність полягає в тому, як повітря обробляється за допомогою різних схем установки (рис.1):

- Пасивний метод: повітря забирається безпосередньо з атмосфери та нагрівається, або охолоджується теплообмінником. Потім повітря подається в акумуляторний блок для терморегулювання;
- Активний метод: частина відпрацьованого повітря подається до вхідного отвору та змішується з зовнішнім повітрям з атмосфери. Потім теплообмінник охолоджує або нагріває повітря до досягнення оптимальної температури для керування акумуляторним блоком.



Рисунок 2 – Структура батареї з повітряною системою терморегуляції батареї

Використовуються на практиці обидві системи повітряних СТР. Ці установки можуть використовуватися як системи охолодження, так і нагрівання (рис. 2). Фактично, під час фази

оохолодження є холодний теплообмінник (випарник), у якому температура повітря знижується за допомогою випарника системи HVAC транспортного засобу. Інакше, якщо акумуляторний блок потрібно нагріти, гарячий теплообмінник (нагрівач) дозволяє підвищити температуру повітря.

Рідинні СТР дуже схожі на повітряні СТР, за винятком холодоагенту, яким є рідка речовина, суміш води та гліколю [2] або діелектричні рідини. Порівняно з повітряними СТР, рідинна система охолодження є ефективнішою, оскільки досягає кращого теплообміну та вимагає меншої потреби в електричній енергії від акумуляторного блоку. Завдяки кращим термічним таким як властивостям теплопровідність та питома теплоємність) та вищій густині за однакових умов, конвективний теплообмін покращується, а масова витрата при тій же швидкості потоку та геометрії повітропроводу є вищою. Що стосується схеми системи, рідинні СТР характеризуються замкнутим контуром, у якому рідина знаходиться в обмеженому просторі. Вона представлена на Рис. 3. Схема рідинної СТР має більше компонентів, ніж повітряна. Дійсно, порівняно з попередніми схемами, вона складається з насоса, який необхідний для генерування масової витрати, та розширювального бака для керування змінами об'єму, спричиненими коливаннями температури навколишнього середовища. Як згадувалося раніше, рідинна система може використовуватися як система охолодження, так і нагрівання за допомогою одного проміжного теплообмінника, який може використовуватися як охолоджувач або нагрівач. Як правило, система HVAC транспортного засобу є джерелом теплової або охолоджуючої енергії за допомогою чотирьохходового клапана, який може перемикає функціонування з режиму холодильника на режим теплового насоса. У деяких застосуваннях для холодної погоди тепло, що розсіюється електричним двигуном, може передаватися рідині за допомогою іншого проміжного теплообмінника для відновлення частини теплової енергії, розсіяної в навколишнє середовище [2]. З іншого боку, складність схеми, спричинена більшою кількістю компонентів, є одним із недоліків рідинних систем. Ця проблема збільшує вагу транспортного засобу та займаний об'єм акумуляторного блоку. З цієї причини вартість встановлення вища, ніж інші рішення, і операції з його обслуговування зростають.

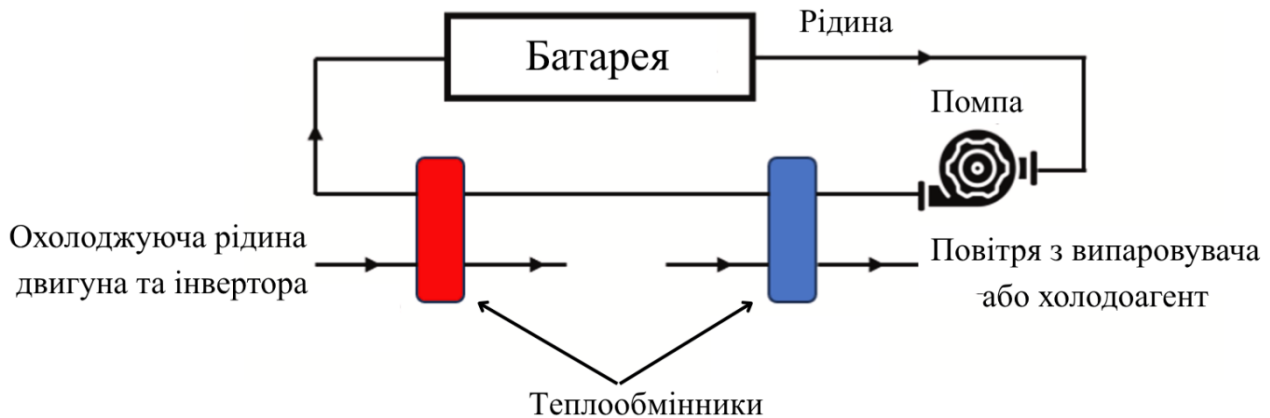


Рисунок 3 – Схема роботи рідинної системи терморегуляції батареї

Щодо того, як робоча рідина взаємодіє з поверхнею батареї, рідинні СТР класифікуються на три категорії:

- Занурювальний теплообмін: елементи акумуляторного блоку повністю занурені в діелектричну рідину. Цей метод характеризується найвищим коефіцієнтом конвективного теплообміну завдяки більшій площі контакту між рідиною та елементами батареї.
- Прямий контакт: рідина протікає безпосередньо навколо елементів батареї. Ця схема є однією з найефективніших завдяки великій площі контактної поверхні. Недоліком цього методу є необхідність використання непровідної рідини, щоб уникнути короткого замикання між елементами.
- Непрямий контакт: рідина протікає через канали в холодній пластині для керування температурою акумуляторного блоку. Холодна пластина розміщується в безпосередньому контакті з поверхнею елементів батареї.

• СТР на основі холодоагенту. В останні роки проводилися дослідження, які зосередили свою увагу на впровадженні машин, заснованих на зворотних циклах. Зокрема, цикли парокомпресійного охолодження можуть використовуватися для охолодження батарей за допомогою спеціального випарника, який має роль зниження середньої температури акумуляторного блоку. Найважливішою

перевагою, досягнутою цими системами, є ефективність теплообміну. Добре відомо, що двофазний теплообмін досягає найвищого коефіцієнта конвективної тепловіддачі порівняно з рідинами та газами, а його робоча температура підтримує постійне значення. Крім того, фіксована температура дозволяє контролювати належні умови для терморегулювання Li-ion батареї та отримувати більш однорідне температурне поле. У літературі є багато прикладів, коли акумуляторні блоки EM охолоджуються за допомогою холодильників. Ці методи зазвичай використовують систему HVAC транспортного засобу, застосовуючи теплообмінник, розташований паралельно до випарника.

- СТР на основі матеріалів зі зміною фазового стану (МЗФС). Матеріали зі зміною фазового стану (МЗФС) — це матеріали, які можуть поглинати та вивільняти значні обсяги прихованої теплоти за відносно постійної температури. Ці СТР є пасивними системами, які не вимагають додаткової електричної енергії. Головна перевага пов'язана з термічною ізоляцією, що є фундаментальним для переривання ланцюгової реакції, яка спричиняє пожежу та вибух акумуляторного блоку.

- СТР на основі теплових труб (ТТ). Теплова труба (ТТ) — це закритий корпус труби, в якому є гнотова структура та певна кількість рідкої робочої рідини. Коли подається тепло, робоча рідина випаровується, і пара переходить на холодну сторону, де вона конденсується, вивільняє приховану теплоту та повертається на гарячу сторону за допомогою капілярної дії гнотової структури. Теплові труби використовуються для передачі тепла з мінімальною різницею температур та зменшення теплового опору акумуляторного блоку. Теплові труби зазвичай використовуються як додатковий компонент до системи охолодження або нагрівання і ще не повністю впроваджені як автономні СТР.

3.6. Гібридні СТР (ГСТР). Гібридні СТР (ГСТР) складаються з двох або більше СТР, які працюють разом для покращення теплообміну та зменшення загальної ваги системи. Наприклад, чисельні симуляції показали, що гібридна конструкція холодної пластини (на основі МЗФС) може забезпечити зменшення ваги на 53% порівняно з базовою конструкцією охолоджувальної пластини через меншу густину МЗФС. Іншим важливим результатом є потужність накачування, яка зменшується на 90%: згідно з оцінками, ця система потенційно може забезпечити економію понад 200 кВт·год електричної енергії.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

СТР	Тип	Переваги	Недоліки
Повітряна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Висока надійність Низька вартість	Низька ефективність. Пил і забруднювачі в повітропроводах.
Рідинна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Просте обслуговування Висока ефективність теплообміну	Велика кількість компонентів. Висока вартість встановлення та обслуговування.
Холодоагентна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Низька потреба в енергії Висока ефективність теплообміну Зменшення ваги транспортного засобу	Висока складність установки. Не завжди зворотний пристрій може бути реверсивним.
МЗФС (PCM)	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Фіксована температура під час зміни фазового стану Не потребує додаткової електричної енергії	Низька теплопровідність, що не дозволяє розсіювати тепло під час охолодження. Додавання струмопровідних матеріалів може спричинити пожежі.
Теплові труби	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Не потребує додаткової електричної енергії Низька вартість обслуговування Висока теплопровідність	Мала площа контакту. Терморегулювання досягається не завжди. Немає автономних застосувань.
Внутрішні стратегії	Лише внутрішнє нагрівання	Висока ефективність нагрівання Високі швидкості нагрівання Хороша температурна	Для попереднього нагрівання змінним струмом потрібне зовнішнє джерело енергії. Висока деградація

СТР	Тип	Переваги	Недоліки
		однорідність	акумуляторного блоку через утворення літєвого осаду (<i>Li-ion plating</i>).

ВИСНОВКИ

Системи терморегулювання є фундаментальною частиною силових установок електромобілів, незамінною для контролю середньої температури акумуляторного блоку, від ефективності її роботи залежить ємність тягової батареї. Аналіз роботи дає можливість зрозуміти, як автомобільна промисловість впроваджує іновачії та нові технічні рішення та висвітлити зв'язок між дослідженнями науковців та виробниками. Є кілька способів керування температурою акумуляторних блоків при високих та низьких температурах навколишнього середовища за допомогою активних або пасивних систем. Перспективним є застосування внутрішнього нагрівання батареї, при якому можна досягати швидшого нагрівання, ніж при застосуванні звичайної системи розігріву. Проте ця технологія ще не є досконалою та готовою для подальшого впровадження на практиці через утворення осаду літію в батареї.

Для досягнення покращеного теплообміну необхідно використовувати вдосконалені форми повітропроводів та холодних пластин, нових схем установок для підвищення ефективності. Впровадження пасивних методів, такі як МЗФС, дозволяє зменшити споживання енергії СТР, оскільки тепла енергія роботи речовин у фазовому переході може підтримувати постійну температуру протягом часу, не вимагаючи жодних енерговитрат. Крім того, низька теплопровідність МЗФС є важливою для подолання феномену термічного розгону, оскільки елементи Li-іон ізольовані один від одного.

Більшість нових транспортних засобів, випущених на ринок, використовують непряму рідинну СТР, температура якої керується системою кондиціонування автомобіля. Кілька виробників, таких як Nissan та Honda, змінили свою стратегію, відмовившись від повітряного методу на користь рідинних СТР через їхню вищу ефективність конвективного теплообміну.

Виробники автомобілів витрачають значні ресурси на дослідження того, як покращити технологію активного охолодження та нагрівання, домінуючу на автомобільному ринку. Теплопровідні клеї є можливим простим та перспективним рішенням для впровадження для непрямих рідинних СТР з метою збільшення контактної поверхні між холодною пластиною та акумуляторним блоком. Необхідно проводити нові дослідження, що вивчають властивості рідин, таких як діелектричні оливи, рідкі метали та нанорідини для підвищення теплопровідності рідини замість класичних сумішей води та гліколю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.K. Ogura, M.L. Kolhe, Battery technologies for electric vehicles, in: *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier Inc., 2017, pp. 139–167, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>.
- 2.S. Shahid, M. Agelin-Chaab, A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries, *Energy Conversion and Management*: x. 16 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>.
- 3.P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technol.* 56 (2020) 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- 4.X. Hu, Y. Zheng, D.A. Howey, H. Perez, A. Foley, M. Pecht, Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives, *Prog Energy Combust Sci.* 77 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>.
- 5.G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, C. Li, An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles, *Appl Therm Eng.* 219 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>.
- 6.X. Lin, K. Khosravinia, X. Hu, J. Li, W. Lu, Lithium Plating Mechanism, Detection and Mitigation in Lithium-Ion Batteries, *Prog Energy Combust Sci.* 87 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100953>.
- 7.A. Pesaran, S. Santhanagopalan, G.-H. Kim, Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf> (accessed October 13, 2023).
- 8.L. He, H. Jing, Y. Zhang, P. Li, Z. Gu, Review of thermal management system for battery electric vehicle, *J Energy Storage.* 59 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>.

REFERENCES

- 1.K. Ogura, M.L. Kolhe, Battery technologies for electric vehicles, in: *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier Inc., 2017, pp. 139–167, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>.
- 2.S. Shahid, M. Agelin-Chaab, A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries, *Energy Conversion and Management*: x. 16 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>.
- 3.P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technol.* 56 (2020) 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- 4.X. Hu, Y. Zheng, D.A. Howey, H. Perez, A. Foley, M. Pecht, Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives, *Prog Energy Combust Sci.* 77 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>.
- 5.G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, C. Li, An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles, *Appl Therm Eng.* 219 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>.
- 6.X. Lin, K. Khosravinia, X. Hu, J. Li, W. Lu, Lithium Plating Mechanism, Detection and Mitigation in Lithium-Ion Batteries, *Prog Energy Combust Sci.* 87 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100953>.
- 7.A. Pesaran, S. Santhanagopalan, G.-H. Kim, Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf> (accessed October 13, 2023).
- 8.L. He, H. Jing, Y. Zhang, P. Li, Z. Gu, Review of thermal management system for battery electric vehicle, *J Energy Storage.* 59 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>.

M. Bodak, V. Bodak. Types of thermal regulation systems of the traction battery of an electric vehicle and their analysis.

The increase in the production of electric vehicles (EVs) largely depends on the reliability and safety of the main components and assemblies. One of the most expensive and dangerous parts of an EV is the power (traction) electric battery. Lithium-ion batteries (Li-ion) have become the most widespread. An important characteristic that affects their safety is performance and service life. These battery indicators depend on the average operating temperature, which must be in the optimal range to prevent a number of negative phenomena. That is why the operation of thermal control systems (TCS) of EV battery packs is important to ensure correct functioning in any environmental and operating conditions.

Lithium-ion (Li-ion) batteries have become the dominant technology for the automotive industry due to some unique features, such as high power, capacity, storage capacity and a large number of possible recharges. However, under deep discharge conditions, a large amount of thermal energy is generated due to redox reactions, and the battery temperature increases excessively and uncontrollably with possible subsequent self-ignition. Therefore, it is necessary to develop such a battery cooling system to prevent damage to the cells due to high operating temperatures. Other problems arise when Li-ion batteries reach temperatures below optimal values, such as the inability to release energy or rapid degradation and capacity reduction. That is why an effective system is needed that can heat the device to reach the optimal temperature range, i.e., a thermal management system (TMS).

Keywords: electric vehicles, thermal management, safety, lithium-ion battery, heat transfer, energy efficiency

БОДАК Максим Володимирович, викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет email: bodak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

БОДАК Володимир Іванович, доцент кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет email: bodak.lutsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2521-7305>

Maksym BODAK, lecturer at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University email: bodak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

Volodymyr BODAK, associate professor at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University email: bodak.lutsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2521-7305>

Дата надходження статті до видання: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1917

Бугайова¹ М.О., Холодова¹ О.О., Бугайов² І.С., Шевчук Є.В.¹
Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова²
Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДОРОЖНІХ ПАГОРБІВ НА РОБОТУ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ПЕРЕХРЕСТЯ

Досліджено вплив конструктивних параметрів дорожніх пагорбів на швидкість транспортних засобів та ефективність роботи нерегульованих перехресть. Основна мета встановлення дорожніх пагорбів полягає у примусовому зниженні швидкості руху з метою підвищення безпеки, проте неправильне проектування чи розміщення може призвести до збільшення затримок, підвищеної витрати пального та зростання рівня шкідливих викидів. Це зумовлює необхідність науково обгрунтованого підходу до їхнього проектування.

Метою дослідження є створення моделей прогнозування зміни швидкості транспортних засобів залежно від геометричних характеристик дорожніх пагорбів на нерегульованому перехресті. У середовищі PTV VISSIM проведено серію експериментів зі зміною ширини, висоти та відстані від стоп-лінії. Висоту враховано через параметри зони зниження швидкості, що дозволило реалістично відтворити реакцію водіїв. Опрацювання даних у STATISTICA дало змогу побудувати регресійні моделі з високою статистичною надійністю.

Доведено, що найбільший вплив на уповільнення має висота дорожнього пагорба, тоді як ширина та відстань від стоп-лінії визначають характер зміни швидкості у складнішій залежності. Розроблена модель дозволяє визначати оптимальні параметри дорожніх пагорбів, за яких досягається ефект заспокоєння руху без істотного зниження пропускної здатності та з мінімальним впливом на екологічні показники.

Отримані результати мають практичну цінність для транспортного планування, проектування вулично-дорожньої мережі, розробки схем організації руху та оцінювання ефективності заходів з уповільнення транспорту. Вони можуть стати підґрунтям для формування сучасних підходів до проектування дорожніх пагорбів з урахуванням українських умов.

Ключові слова: дорожній пагорб, транспортний засіб, транспортний потік, моделювання, швидкість, висота, ширина, відстань від стоп-лінії, мікросимуляція, модель.

ВСТУП

Дорожні пагорби (ДП), або “лежачі поліцейські” (ЛП), застосовуються як ефективний засіб примусового зниження швидкості транспортних засобів (ТЗ) та підвищення безпеки дорожнього руху (БДР). Водночас їхні конструктивні параметри безпосередньо впливають на ефективність функціонування транспортного потоку (ТП). Неправильно спроектовані чи встановлені ДП здатні призвести до збільшення часу простоїв ТЗ, підвищеної витрати пального та зростання рівня викидів шкідливих речовин [1]. У цьому дослідженні запропоновано розробку моделей, що дають змогу прогнозувати зміну швидкості ТЗ залежно від конструктивних характеристик ДП. З огляду на обмежену кількість подібних досліджень в Україні, отримані результати можуть бути використані для науково обгрунтованого проектування ДП у майбутньому.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

ДП є трохи піднятими нерівностями на дорозі, які використовуються для примусового зниження швидкості руху [2]. ДП є найпоширенішим засобом заспокоєння руху завдяки низькій вартості та простоті встановлення. Більшість ТЗ можуть безпечно перетинати їх зі швидкістю 25–30 км/год. ДП розроблені для створення “гойдалки”, яка збільшує дискомфорт водія зі збільшенням швидкості переходу [2].

В дослідженні [3] авторами пояснюється зниження швидкості руху на 1 км/год кожним сантиметром збільшення висоти ДП. В роботах [4, 5] вивчається вплив ДП різної висоти (3, 5 та 7 см) на швидкість руху автомобілів. Були проведені вимірювання швидкості через 1 день та 1 місяць після та до встановлення ДП. Порівняння між різними вимірюваннями швидкості проводилося за допомогою дисперсійного (ANOVA) та post hoc аналізу. Аналіз показав, що в місцях встановлення ДП спостерігалось значне зниження швидкості порівняно з періодом до їх встановлення.

В статті [6] розроблено модель для оцінки впливу характеристик ДП на час затримки в Йорданії. Модель показала, що ДП спричиняють значні затримки в місцях їх розташування. В роботі [7] також представлено практичне дослідження для збору та аналізу даних про час подорожі на основі GPS з метою оцінки впливу ДП на час подорожі та затримки на міжміських дорогах в Єгипті. Результати довели, що на величину затримки подорожі в різний час доби впливає ДП.

Кілька досліджень досліджували вплив ДП на обсяг транспорту та рівень шуму. Авторами публікації [8] досліджено вплив ДП на обсяг транспорту та рівень шуму в житловому районі Куала-Лумпуру. Для вимірювання даних про обсяг транспорту та рівень шуму були проведені польові дослідження на трьох вибраних дорогах. Перше вимірювання рівня шуму на дорозі показало найвищий обсяг транспорту та найвищий рівень шуму. Кореляційний аналіз показав подібну закономірність у взаємозв'язку між обсягом транспорту та рівнем шуму.

В роботах [9, 10] використовували радар-пістолети для вимірювання швидкості різноманітних ТЗ. У статті [9] вимірювання проводилися на значно ширшому діапазоні — від -100 м до 80 м від ДП. Натомість, дослідження [10] зосередилося на вузькій зоні, а саме від -20 м до 20 м від ДП. Але основним недоліком робіт [9, 10] є неможливість вимірювання швидкості того самого ТЗ у декілька точках.

В роботі [11] використовували радар-пістолет для вимірювання швидкості на шістьох ідентичних ДП. Основне обмеження цієї роботи полягало в тому, що вона не дозволяла аналізувати загальний вплив ДП на швидкість ТЗ, а лише порівнювати характеристики різних профілів швидкості.

В статті [12] для вимірювання швидкості застосували дрон-камеру для відеозйомки та програмне забезпечення Tracker. Основним недоліком цього дослідження було те, що воно проводилося лише для одного конкретного ДП.

В дослідженнях [13, 14] також використовував радар-пістолет, проводячи вимірювання швидкості на відстанях 10 м, 7 м, 5 м та 2 м (ліворуч та праворуч від пагорба). Недоліком роботи є, то що дані збиралися лише для двох категорій ТЗ.

В роботі [15] застосували відеокамери для вимірювання швидкості ТЗ, збираючи дані інтенсивності ТП кожні 15 хвилин. Вимірювання швидкості проводилися на відстанях 10 м, 7 м, 4 м та 1 м до і після ДП. Однак, виявлено, що цей підхід виявився менш ефективним порівняно з вимірюванням за допомогою радар-пістолета.

Автори публікацій [16, 17] використовували мікросимуляцію PTV VISSIM для моделювання руху ТЗ та визначення ефективності дорожнього руху. Для симуляції ДП застосовували інструмент Reduced Speed Area (RSA). Однак, суттєвою прогалиною в дослідженні було те, що модель не була відкалібрована.

В роботі [18] вимірювали вплив ДП на БДР та рівень обслуговування перехрестя. Проте, вони зазначили, що використання радар-пістолета для вимірювання швидкості є менш ефективним порівняно з технікою відеокамери.

Особливо актуальним є дослідження [19], де автори аналізують ефективність впровадження засобів заспокоєння дорожнього руху на перехрестях. У роботі акцентовано увагу на необхідності комплексного підходу до проектування ДП та оцінки їхнього впливу на безпеку руху й пропускну здатність.

Аналіз літератури показав, що попередні роботи не розробляли регресійних моделей для прогнозування зміни швидкості ТЗ залежно від конструктивних характеристик ДП на нерегульованих перехрестях.

Отже, хоча наукові публікації й підкреслюють значення ДП для безпеки та ефективності руху, системних методів для комплексного аналізу та прогнозування їхнього впливу на швидкість наразі бракує. Це доказує актуальність даного дослідження, яке має на меті заповнити ці прогалини шляхом розробки регресійних моделей та симуляційного аналізу впливу ДП на швидкість, що є особливо важливим для України з огляду на недостатність подібних робіт.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міста шляхом оптимізації параметрів ДП на нерегульованих перехрестях. Це допоможе зменшити затримки руху, покращити пропускну здатність та підвищити БДР, враховуючи вплив цих засобів. Отримані результати можуть стати внеском у світову практику та сприяти адаптації сучасних підходів до умов України. Отримані результати можуть бути корисними як для міського планування на локальному рівні, так і для загальних транспортних досліджень у країнах із подібними умовами, сприяючи розробці ефективних рішень для оптимізації руху та зменшення затримок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дане дослідження направлено на визначення впливу ДП на ефективність та безпеку функціонування нерегульованих перехресть. Авторами роботи, спираючись на положення ДСТУ 4123:2020 БДР “Засоби заспокоєння руху” [20], запропоновано провести серію симуляційних

експериментів у програмі PTV VISSIM на нерегульованому перехресті. Метою цих експериментів є дослідження того, як зміна обраних параметрів ДП, розташованого перед нерегульованим перехрестям (на підходах до нього), впливатиме на різні аспекти його роботи.

Параметрами ДП, які можна змінювати у PTV VISSIM є:

- ширина ДП, яка впливає на плавність гальмування та розгону, а також на протяжність зони впливу (змінюється від 1 м до 3 м);
- відстань від стоп-лінії перехрестя, яка визначає, на якій відстані ТЗ почнуть реагувати на ДП перед зупинкою (приймається 10 – 50 м). Цей параметр є важливим для оцінки впливу ДП на черги та процес зупинки перед перехрестям.

У межах даного дослідження, з метою забезпечення підвищення точності та контрольованості отриманих результатів, авторами було прийнято рішення зосередити симуляційні експерименти на одному типовому нерегульованому перехресті. Використання єдиного об'єкта дослідження дозволить ефективно контролювати та мінімізувати вплив зовнішніх геометричних, топографічних та інших інфраструктурних відмінностей, які не є предметом поточного аналізу. Це забезпечує, що спостережувані варіації в ефективності функціонування перехрестя є переважно функцією маніпульованих параметрів ДП, а не наслідком унікальних особливостей різних перехресть. Таким чином, вибір одного нерегульованого перехрестя як об'єкта дослідження є свідомим методологічним кроком, спрямованим на отримання високоякісних, релевантних та інтерпретованих даних для подальшої розробки моделі впливу ДП на швидкість ТП.

У програмному забезпеченні PTV VISSIM неможливо безпосередньо змодельовати фізичну висоту ДП як 3D-об'єкт. PTV VISSIM фокусується на поведінці ТП та взаємодії ТЗ з дорожньою інфраструктурою, а не на детальному геометричному рельєфі. Тому вплив висоти ДП моделюється опосередковано, через відповідні зміни в параметрах поведінки водіїв.

Для імітації впливу різної висоти ДП (наприклад, 0,03 м, 0,07 м, 0,1 м), необхідно використовувати наступні налаштування у програмі PTV VISSIM: на ділянці дороги, де розташований ДП, створюється "зона зниження швидкості". У межах цієї зони необхідно встановити бажану швидкість для різних типів ТЗ. Чим вища висота ДП, тим нижчою буде бажана швидкість, яку водій обирає для його перетину. Для ДП висотою 0,03 м (3 см), водії можуть підтримувати відносно вищу бажану швидкість (при симуляції будемо приймати, 20-25 км/год), для ДП висотою 0,07 м (7 см), бажана швидкість може бути значно нижчою (10-15 км/год) та для ДП висотою 0,1 м (10 см), бажана швидкість буде мінімальною (5-10 км/год) [17, 19]. Такий підхід дозволяє реалістично імітувати поведінку водіїв залежно від висоти ДП у симуляційному середовищі PTV VISSIM.

Рисунок 1 демонструє фрагмент імітації руху ТП на нерегульованому перехресті.

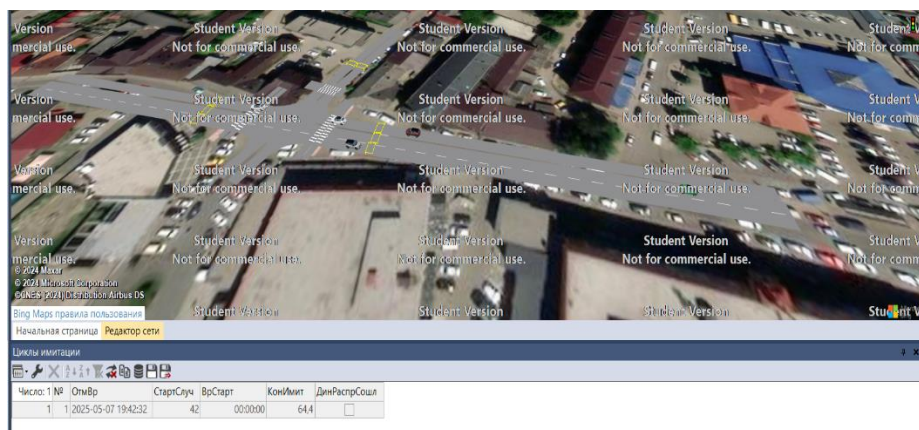


Рисунок 1 - Імітація руху ТП при моделюванні у програмі PTV VISSIM

Оскільки дослідження зосереджено на проектуванні впливу ДП на спеціально змодельованому нерегульованому перехресті, а не на існуючому об'єкті з натурними даними. Валідація моделі базувалася на двох ключових підходах: внутрішній консистентності та порівнянні з науково обґрунтованими принципами та літературними даними.

Внутрішня валідація моделі здійснювалася шляхом аналізу логічності та послідовності отриманих симуляційних результатів. Очікувалося, що зі збільшенням висоти ДП, бажана швидкість, а отже, і середня швидкість проїзду, буде знижуватися, що і було підтверджено симуляціями. Крім того, аналізувалася залежність інших показників (середня затримка руху, середня довжина затору,

середній час простою, кількість зупинок ТЗ та екологічні параметри – викиди CO, NOx та витрати палива) від параметрів ДП (див. рис. 2).

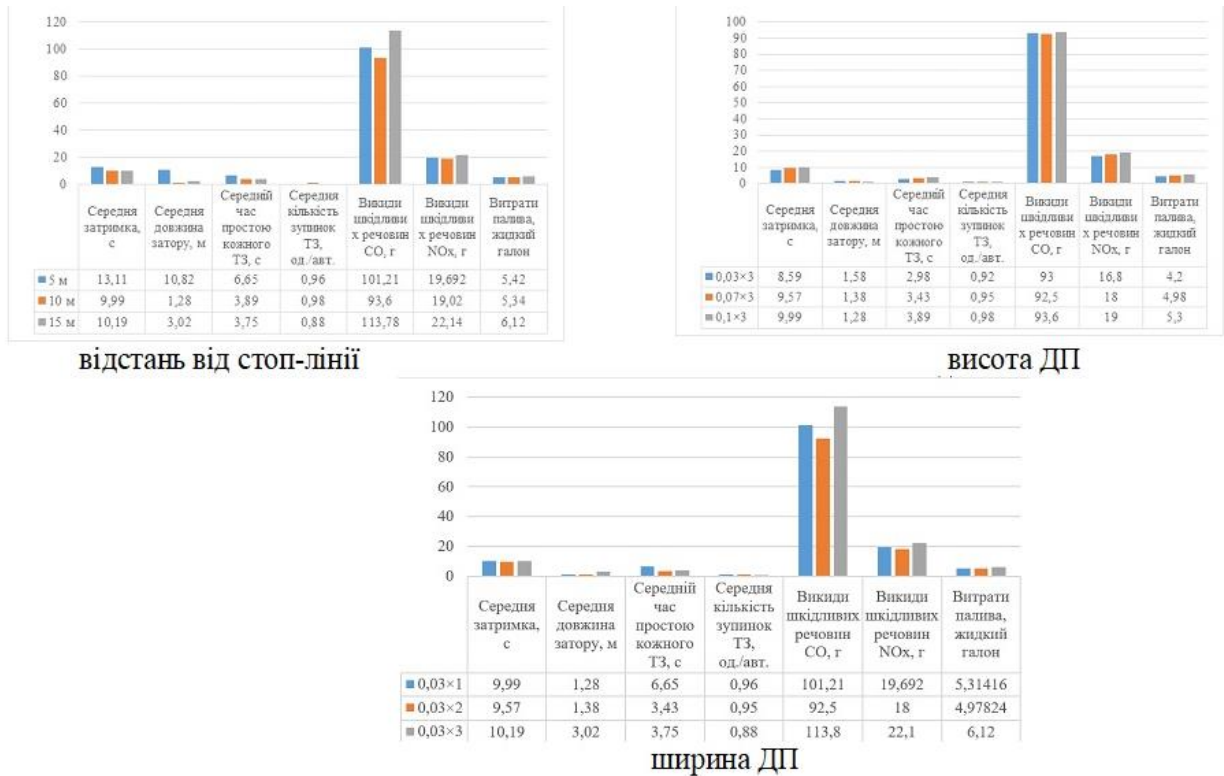


Рисунок 2 - Результати моделювання в програмі PTV VISSIM

Результати моделювання в програмі PTV VISSIM (див. рис. 2) підтвердили аналіз [1, 16, 17, 19], щодо зниження швидкості та впливу ДП на ефективність ТП.

Рисунок 2 демонструє, що оптимізація параметрів ДП є складним завданням, що вимагає знаходження балансу між досягненням бажаного ефекту уповільнення руху та мінімізацією негативних наслідків для ТП (затримки, зупинок, екологічне навантаження). Графіки чітко підтверджують, що неправильний вибір будь-якого з цих параметрів може призвести до значного погіршення функціонування перехрестя.

В результаті моделювання у програмі PTV VISSIM було сформовано широкий масив вихідних даних, які використовувалися для побудови моделі.

Цільова функція впливу параметрів ДП на середню швидкість ТП на нерегульованому перехресті має наступний вид:

$$V_{ДП} = (L_{ДП}, H_{ДП}, d_{stop}) \rightarrow \max, (1)$$

де $L_{ДП}$ - ширина ДП, м; $H_{ДП}$ - висота ДП, м; d_{stop} - відстань від стоп-лінії до ДП, м.

Обмеження моделі (1):

$$\begin{cases} 1 \text{ м} \leq L_{ДП} \leq 3 \text{ м} \\ 0,03 \text{ м} \leq H_{ДП} \leq 0,1 \text{ м}, (2) \\ 1 \text{ м} \leq d_{stop} \leq 25 \text{ м} \end{cases}$$

Важливо зазначити, що під час експерименту інтенсивність транспортного та пішохідного потоків залишалася незмінною для забезпечення контрольованості та фокусу на впливі параметрів ДП.

Для визначення виду та параметрів моделей були використана сучасна комп'ютерна програма обробки статистики STATISTICA, яка дозволяє описати отримані дані у програмі PTV VISSIM різними видами математичних функцій.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В першу чергу необхідно отримати модель впливу параметрів ДП на швидкість ТП, що дозволить визначити, які характеристики ДП мають найбільший вплив на зміну швидкості руху.

Графік (див. рис. 3) демонструє, що висота ДП є значно важливішим фактором впливу на зниження швидкості, ніж його ширина в досліджуваному діапазоні параметрів. Збільшення висоти ДП призводить до різкого зменшення швидкості. Вплив ширини ДП є менш вираженим і має більш складний, ймовірно, з оптимальною зоною, характер. Для досягнення низьких швидкостей необхідно використовувати ДП з більшою висотою, проте слід враховувати вплив ширини, яка також сприяє зниженню швидкості, особливо у поєднанні з певною висотою. Модель підтверджує нелінійний характер взаємозв'язку між цими параметрами та швидкістю руху.

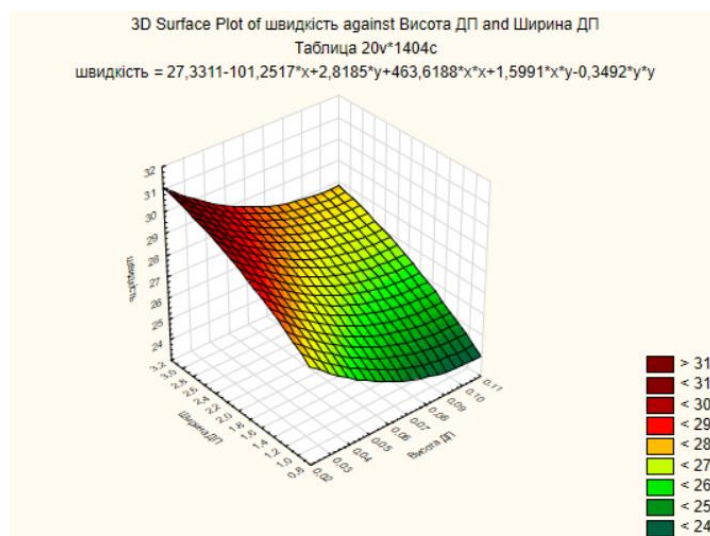


Рисунок 3 - Залежність швидкості від висоти та ширини ДП

Усі три графіки (див. рис. 3 – рис. 5) підкреслюють нелінійний характер взаємозв'язку між параметрами ДП та швидкістю. Висота ДП є ключовим параметром для зниження швидкості, тоді як інші параметри (відстань від стоп-лінії, ширина ДП, зона впливу ДП) мають більш складний, нелінійний вплив, часто з оптимальними значеннями, які необхідно враховувати для ефективного проектування ДП.

Це вказує на те, що для досягнення бажаного рівня заспокоєння руху, проектування дорожніх пагорбів має базуватися на комплексних моделях, що враховують ці нелінійні залежності та взаємодії між параметрами, а не на ізольованій оцінці кожного фактора. Застосування таких моделей дозволяє знайти баланс між ефективним зниженням швидкості та мінімізацією негативних наслідків для ТП.

Результати обробки експериментальних даних наведені в таблиці 1.

З отриманих моделей (див. табл. 1) можна зробити висновки, що всі отримані моделі є адекватними, про що свідчать високі коефіцієнти кореляції (R^2 від 0,83 до 0,92) та значні значення критерію Фішера (F від 103,03 до 240,25), що підтверджує їхню статистичну значущість та добру відповідність експериментальним даним. Зокрема, модель, що враховує залежність швидкості від висоти та ширини ДП, є найбільш точною та адекватною, маючи найвищий коефіцієнт кореляції 0,92 та найменшу стандартну похибку 0,77.

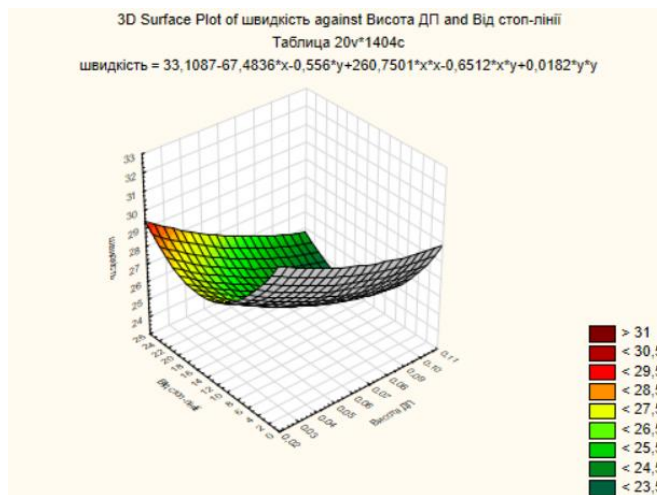


Рисунок 4 - Залежність швидкості від висоти та відстань від стоп-лінії до ДП

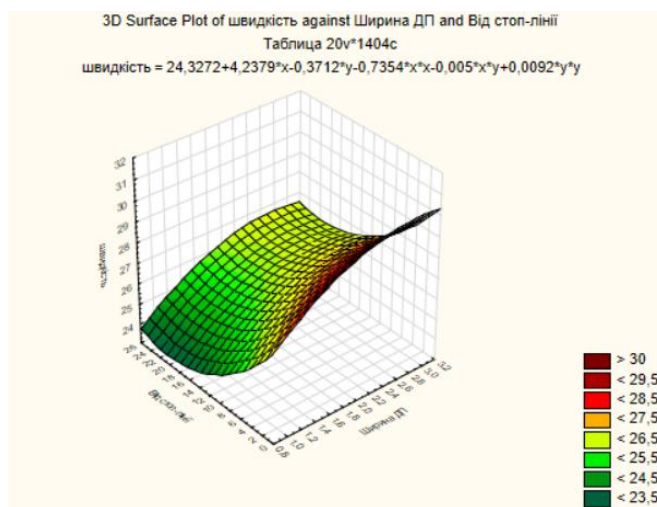


Рисунок 5 - Залежність швидкості від ширини та відстань від стоп-лінії до ДП

Таблиця 1 – Результати моделювання у програмі STATISTICA

Формула	Коефіцієнт кореляції, R ²	Критерій Фішера, F	Стандартна похибка,
$V_{ДП} = 27,331 - 101,252 \cdot H_{ДП} + 2,819 \cdot L_{ДП} + 463,62 \cdot H_{ДП}^2 - 0,349 \cdot L_{ДП}^2 + 1,6 \cdot L_{ДП} \cdot H_{ДП}$	0,92	10 3,03	0,77
$V_{ДП} = 33,11 - 67,48 \cdot H_{ДП} - 0,56 \cdot d_{stop} + 260,75 \cdot H_{ДП}^2 + 0,018 \cdot d_{stop}^2 - 0,65 \cdot d_{stop} \cdot H_{ДП}$	0,83	11 2,96	1,03
$V_{ДП} = 24,32 + 4,24 \cdot L_{ДП} - 0,37 \cdot d_{stop} - 0,74 \cdot L_{ДП}^2 + 0,009 \cdot d_{stop}^2 - 0,005 \cdot d_{stop} \cdot L_{ДП}$	0,91	24 0,25	1,77

Наступний етап передбачає розробку моделі за формулою 1. Метою є створення математичної залежності, яка буде комплексно враховувати всі три ключові параметри ДП, що впливають на швидкість ТП. За допомогою програми STATISTICA була отримана регресія та результати моделювання, які представлені на рисунку 6.

Regression Summary for Dependent Variable: швидкість (Таблиця)						
R= ,96700105 R ² = ,93509102 Adjusted R ² = ,93433627						
F(3,258)=1238,9 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,46773						
	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(258)	p-value
N=262						
Intercept			28,0542	0,125389	223,7369	0,00
Висота ДП	-0,431623	0,015868	-39,1490	1,439286	-27,2003	0,00
Ширина ДП	0,641052	0,015885	1,5041	0,037271	40,3553	0,00
Від стоп-лінії	-0,531226	0,015890	-0,1588	0,004749	-33,4308	0,00

Рисунок 6 - Результати множинної регресії

Всі предиктори в моделі виявились статистично достовірними (p-value=0,00), а її загальна статистична значущість підтверджена високою F-статистикою 1238,9. Завдяки цьому та високому коефіцієнту кореляції 93,5%, отримана модель вважається адекватною. Цільова функція має наступний вид:

$$V_{ДП} = 28,1 + 1,5 \cdot L_{ДП} - 39,15 \cdot H_{ДП} - 0,16 \cdot d_{стоп}, (3)$$

Виходячи з цих показників (див. рис. 7), можна однозначно стверджувати, що побудована регресійна модель є високо статистично значущою та адекватною. Вона успішно пояснює зміни швидкості і може бути використана для прогнозування та розуміння впливу вхідних параметрів.

Analysis of Variance; DV: швидкість (Таблиця)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-value
Regress.	813,1171	3	271,0390	1238,932	0,00
Residual	56,4422	258	0,2188		
Total	869,5593				

Рисунок 7 - Дисперсійний аналіз (ANOVA)

Графік (див. рис. 8) використовується для візуальної оцінки, чи відповідають залишки регресійної моделі припущенню про нормальний розподіл, що є одним з ключових припущень для достовірності статистичних висновків у регресійному аналізі.

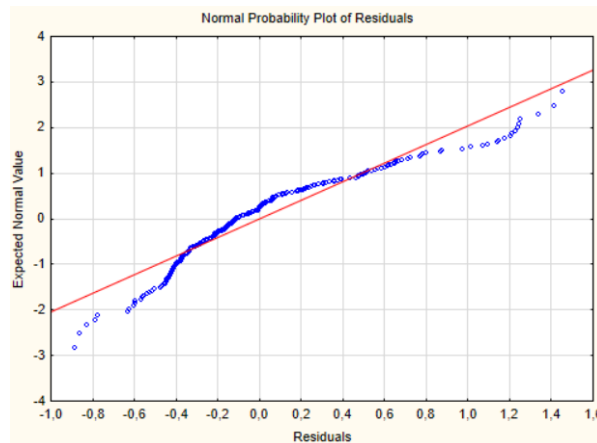


Рисунок 8 - Графік нормальної ймовірності залишків

Оскільки точки на графіку нормальної ймовірності залишків лежать переважно вздовж прямої лінії, це означає, що припущення про нормальність розподілу залишків виконується.

Таким чином, завдяки високим показникам достовірності, розроблена модель може бути ефективно використана для прогнозування та аналізу впливу параметрів ДП на швидкість руху ТЗ на нерегульованому перехресті.

ВИСНОВКИ

Застосування такого підходу є надзвичайно цінним, оскільки дозволяє наочно та кількісно оцінити вплив ДП на ТП в умовах моделювання. Для проєктувальників і міських інженерів це особливо важливо, адже дає можливість обґрунтовано визначати параметри елементів заспокоєння

руху, забезпечувати баланс між безпекою та пропускнуою здатністю й враховувати умови конкретних перехресть. Отримані результати можуть стати корисними у транспортному плануванні, проектуванні вулично-дорожньої мережі, розробці схем організації руху та при оцінюванні ефективності заходів зі зниження швидкості.

Доведено, що висота ДП є ключовим фактором, що визначає ступінь зниження швидкості ТЗ, з яскраво вираженою нелінійною залежністю, безпосередньо формуючи поведінку водіїв при перетині. Саме висота, через свою пряму кореляцію з фізичним впливом на ТЗ та дискомфортом для водія, змушує водіїв суттєво знижувати швидкість для безпечного та комфортного проїзду.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kiran, K. R., Molugaram, K. and Sandeep, M. (2020) Analysis of Speed Profiles at Speed Hump under Various Dimensions & Simulating their LOS Using VISSIM, *Transportation Research Procedia*, 48, pp. 1200–1210. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.143>
2. H. Faheem (2012) Suitability of existing traffic calming measures for use on some highways in Egypt 9th International Conference on Civil and Architecture Engineering (ICCAE-9), Cairo, 9(9):1-13. DOI: [10.21608/iccae.2012.44388](https://doi.org/10.21608/iccae.2012.44388)
3. U. Engel, L.K. Thomsen (1992) Safety effects of speed reducing measures in Danish residential areas *Accident Analysis & Prevention*, 24 (1), pp. 17-28. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90068-T](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90068-T)
4. B. Antic, D. Pešic, M. Vujanic, et al. (2013) The influence of speed bumps heights to the decrease of the vehicle speed–Belgrade experience *Safety Science*, 57, pp. 303-312. DOI: [/10.1016/j.ssci.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.03.008)
5. H. Mahdy (2012) Speed calming using vertical deflections in road alignment 12th International Conference on Transportation Professionals, Beijing, 9(9):1-10. DOI: [10.1061/9780784412442.212](https://doi.org/10.1061/9780784412442.212)
6. Al-Omari, G.R. (2002) Al-Massaeid Effect of speed humps on traffic delay in Jordan Road and Transport Research, 11 (4):9-55. <https://www.researchgate.net/publication/299254332>
7. I.H. Hashim, R.M. Hassouna, F.F Asal (2012) Using GPS to assess the impact of speed humps on traffic delay in Egypt. *Civil Engineering Research Magazine (CERM)*, 34 (1), pp. 230-239.
8. N. Rosli, A. Kadar Hamsa (2013) Evaluating the effects of road hump on traffic volume and noise level at Taman Keramat residential area, *Kuala Lumpur Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, pp. 1171-1188. DOI: [10.11175/easts.10.1171](https://doi.org/10.11175/easts.10.1171)
9. Kiran, K. R., Kumar, M. and Abhinay, B. (2020) Critical Analysis of Speed Hump and Speed Bump and Geometric Design of Curved Speed Hump’, *Transportation Research Procedia*, 48, pp. 1211– 1226. DOI: [10.1016/j.trpro.2020.08.144](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.144)
10. N A Mustafa , Kadar Hamsa , A Evaluating the Effects of Road Hump on Speed and Noise Level at a University Setting *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* Posted: 2019
11. Rosli, N.S. and Kadar Hamsa, A.A. (2013) Evaluating the Effects of Road Hump on Traffic Volume and Noise Level at Taman Keramat Residential Area, Kuala Lumpur. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, 1171-1188. <https://doi.org/10.11175/easts.10.1171>
12. Arthanayake, C. and Wickramasinghe, V. (2020) ‘Effects of speed humps on driver behaviour’. Chimba, D. and Mbuya, C. (2019) ‘Simulating The Impact of Traffic Calming Strategies final report’, TRCLC 17-10, Transportation Research Center Reports. 42. Available at: <https://scholarworks.wmich.edu/transportation-reports/42>.
13. Gupta, A. (2014) ‘Study on Speed Profile Across Speed Bumps’, Doctoral dissertation, National Institute of Technology Rourkela, pp. 1–43. <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5881/1/e-74.pdf>
14. Antić, B. et al. (2013) ‘The influence of speed bumps heights to the decrease of the vehicle speed - Belgrade experience’, *Safety Science*, 57, pp. 303–312. doi: 10.1016/j.ssci.2013.03.008.
15. Teja, T. and Jyothi, M. (2017) ‘Speed Profile Analysis at Speed Breakers on An Urban Road’, *imanager’s Journal on Civil Engineering*, 7(1):25. DOI: 10.26634/jce.7.1.10370.
16. Chimba, Deo and Mbuya, Christian, "Simulating the Impact of Traffic Calming Strategies" (2019). *Transportation Research Center Reports*. 42. <https://scholarworks.wmich.edu/transportation-reports/42>
17. Gamlath, K.G. Dilanka and Amarasingha, Niranga and Wickramasinghe, Vasantha SK, Evaluating the Effectiveness of Speed Humps Related to Speed Profile and Noise Profile (March 1, 2023). *JAET Volume 01 Issue 02, March 2023* , <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4418166>
18. Nair, P. M., Bindhu, B. K. and Elangovan, T. (2013) Impact analysis of speed restriction measures using VISSIM 5.40, 2(1), pp. 303–310. Режим доступа: https://www.ijirset.com/upload/2013/special/environmental/41_IMPACT.pdf

19. БУГАЙОВ, І., ХОЛОДОВА, О., & БУГАЙОВА, М. (2023). ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАСПОКОЄННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТІ. *СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ*, 1(20), 78-85. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1036>

20. ДСТУ 4123:2020. Безпека дорожнього руху. Засоби заспокоєння руху. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2020-08-06]. ДП «УкрНДНЦ», 2020. 43 с. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90493

REFERENCES

1. Kiran, K. R., Molugaram, K. and Sandeep, M. (2020) Analysis of Speed Profiles at Speed Hump under Various Dimensions & Simulating their LOS Using VISSIM, *Transportation Research Procedia*, 48, pp. 1200–1210. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.143>

2. H. Faheem (2012) Suitability of existing traffic calming measures for use on some highways in Egypt 9th International Conference on Civil and Architecture Engineering (ICCAE-9), Cairo, 9(9):1-13. DOI: [10.21608/iccae.2012.44388](https://doi.org/10.21608/iccae.2012.44388)

3. U. Engel, L.K. Thomsen (1992) Safety effects of speed reducing measures in Danish residential areas *Accident Analysis & Prevention*, 24 (1), pp. 17-28. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90068-T](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90068-T)

4. B. Antic, D. Pešic, M. Vujanic, et al. (2013) The influence of speed bumps heights to the decrease of the vehicle speed–Belgrade experience *Safety Science*, 57, pp. 303-312. DOI: [/10.1016/j.ssci.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.03.008)

5. H. Mahdy (2012) Speed calming using vertical deflections in road alignment 12th International Conference on Transportation Professionals, Beijing, 9(9):1-10. DOI: [10.1061/9780784412442.212](https://doi.org/10.1061/9780784412442.212)

6. Al-Omari, G.R. (2002) Al-Massaeid Effect of speed humps on traffic delay in Jordan Road and Transport Research, 11 (4):9-55. <https://www.researchgate.net/publication/299254332>

7. I.H. Hashim, R.M. Hassouna, F.F Asal (2012) Using GPS to assess the impact of speed humps on traffic delay in Egypt. *Civil Engineering Research Magazine (CERM)*, 34 (1), pp. 230-239.

8. N. Rosli, A. Kadar Hamsa (2013) Evaluating the effects of road hump on traffic volume and noise level at Taman Keramat residential area, *Kuala Lumpur Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, pp. 1171-1188. DOI: [10.11175/easts.10.1171](https://doi.org/10.11175/easts.10.1171)

9. Kiran, K. R., Kumar, M. and Abhinay, B. (2020) Critical Analysis of Speed Hump and Speed Bump and Geometric Design of Curved Speed Hump’, *Transportation Research Procedia*, 48, pp. 1211– 1226. DOI: [10.1016/j.trpro.2020.08.144](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.144)

10. N A Mustafa , Kadar Hamsa , A Evaluating the Effects of Road Hump on Speed and Noise Level at a University Setting *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* Posted: 2019

11. Rosli, N.S. and Kadar Hamsa, A.A. (2013) Evaluating the Effects of Road Hump on Traffic Volume and Noise Level at Taman Keramat Residential Area, Kuala Lumpur. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, 1171-1188. <https://doi.org/10.11175/easts.10.1171>

12. Arthanayake, C. and Wickramasinghe, V. (2020) ‘Effects of speed humps on driver behaviour’. Chimba, D. and Mbuya, C. (2019) ‘Simulating The Impact of Traffic Calming Strategies final report’, TRCLC 17-10, *Transportation Research Center Reports*. 42. Available at: <https://scholarworks.wmich.edu/transportation-reports/42>.

13. Gupta, A. (2014) ‘Study on Speed Profile Across Speed Bumps’, *Doctoral dissertation*, National Institute of Technology Rourkela, pp. 1–43. <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5881/1/e-74.pdf>

14. Antić, B. et al. (2013) ‘The influence of speed bumps heights to the decrease of the vehicle speed - Belgrade experience’, *Safety Science*, 57, pp. 303–312. doi: 10.1016/j.ssci.2013.03.008.

15. Teja, T. and Jyothi, M. (2017) ‘Speed Profile Analysis at Speed Breakers on An Urban Road’, *imanager’s Journal on Civil Engineering*, 7(1):25. DOI: 10.26634/jce.7.1.10370.

16. Chimba, Deo and Mbuya, Christian, "Simulating the Impact of Traffic Calming Strategies" (2019). *Transportation Research Center Reports*. 42. <https://scholarworks.wmich.edu/transportation-reports/42>

17. Gamlath, K.G. Dilanka and Amarasingha, Niranga and Wickramasinghe, Vasantha SK, Evaluating the Effectiveness of Speed Humps Related to Speed Profile and Noise Profile (March 1, 2023). *JAET Volume 01 Issue 02*, March 2023 , <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4418166>

18. Nair, P. M., Bindhu, B. K. and Elangovan, T. (2013) Impact analysis of speed restriction measures using VISSIM 5.40, 2(1), pp. 303–310. Режим доступа: https://www.ijirset.com/upload/2013/special/environmental/41_IMPACT.pdf

19. Buhaiov, I. S., Kholodova, O. O., & Buhaiova, M. O. (2023). Otsinka efektyvnosti vprovadzhennia zasobiv zaspokoiennia dorozhnogo rukhu na perekhresti [Evaluation of the effectiveness of implementing traffic calming measures at an intersection]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 78-85. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1036>

20. DSTU 4123:2020. Bezpeka dorozhnogo rukhu. Zasoby zaspokoiennia rukhu. Zahalni tekhnichni vymohy. [Chynnyi vid 2020-08-06]. DP «UkrNDNTs», 2020. 43 s. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90493

M. Buhaiova, O. Kholodova, I. Bugayov, Y. Shevchuk. Modeling the influence of road humps parameters on the operation of an uncontrolled intersection

The article investigates the influence of the design parameters of road humps on the speed of vehicles and the operation of uncontrolled intersections. Proper design of road humps provides a reduction in speed and increased safety, while errors in the selection of parameters lead to increased delays, additional fuel consumption, and increased emissions.

The aim of the study is to develop models for predicting changes in vehicle speed depending on the geometric characteristics of the road hump. For this purpose, a series of experiments was conducted in the PTV VISSIM environment with changes in width (1–3 m), height (0.03–0.10 m), and distance from the stop line (10–50 m). The height was taken into account through the parameters of the speed reduction zone. Processing the results in STATISTICA allowed us to build regression models with high adequacy ($R^2 = 0.83–0.92$).

It was established that the height of the road hump has the greatest impact on speed reduction, while the width and distance to the stop line determine the nature of deceleration in a more complex relationship. The optimal selection of parameters allows for the provision of the effect of traffic calming without significant loss of capacity and with minimal environmental consequences. The results can be used in transport planning, design of the street and road network, and in assessing the effectiveness of traffic calming measures in Ukrainian cities.

Key words: road hump, vehicle, traffic flow, simulation, speed, height, width, distance from the stop line, microsimulation, model.

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>.

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>

БУГАЙОВ Ігор Сергійович, старший викладач кафедри транспортних систем і логістики Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, e-mail: igorbugayov1@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9091-0248>

ШЕВЧУК Євгеній Вікторович аспірант, здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, <https://orcid.org/0009-0001-9004-1695>

Maryna BUHAIKOVA, 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>

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>

Igor BUGAYOV, senior lecturer of Department of Transport Systems and Logistics Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova e-mail: igorbugayov1@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9091-0248>

Yevhenii SHEVCHUK, PhD student of Department of Traffic Management and Road Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0009-0001-9004-1695>

Дата надходження статті до видання: 26.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1918

Голотюк М.В., Налобіна О.О., Бундза О.З.

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне***АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕМЕНТІВ РУШІЯ ВАЖКИХ ТРАКТОРІВ НА ВЕЛЕЧИНУ ТИСКУ НА ГРУНТ**

Ущільнення ґрунту є фізичним процесом його деградації, що зменшує пористість і, як наслідок, посилює ерозійні процеси та знижує врожайність. Рослини, вирощені на ущільнених ділянках, мають слабший розвиток і меншу життєздатність. Це пояснюється тим, що погіршується газообмін у ґрунті, і це впливає на доступність кисню та інших газів для коріння рослин. Сучасна практика рослинництва показує, що широке використання важких тракторів на полях підвищує інтенсивність і частоту механічного впливу на ґрунт. Багатократне пересування сільськогосподарської техніки призводить до значного ущільнення ґрунту на глибину до 100 см, при цьому машинні колії можуть займати до 80 % оброблюваної площі. Під дією важкої техніки щільність ґрунту зростає на 20–40 %. Зниження ущільнення ґрунту – одна з важливих стратегій. Удосконалення ходових систем машин і агрегатів, а також зниження їхньої маси відіграють ключову роль у цьому процесі.

У даній роботі встановлено, що виробники важких потужних тракторів постійно шукають шляхи зменшення питомого тиску на ґрунт, зокрема за рахунок зміни конструктивних параметрів, технологій виготовлення, матеріалів складових рушіїв. Ефективність роботи таких тракторів, зокрема, залежить від правильно підібраної колісної комплектації, особливо при виконанні операцій, що вимагають мінімального впливу на ґрунт.

Проаналізовано особливостей конструкцій рушіїв сучасних тракторів значної потужності, які застосовують з метою зниження тиску на ґрунт. Зокрема, проаналізовано моделі колісних рушіїв тракторів потужності 300-500 к.с., виконано розрахунок питомого тиску на ґрунт; проведено порівняння значень питомого тиску на ґрунт тракторів із колісними, напівгусеничними і повногусеничними рушійними потужністю 300-500 к.с.; виконано аналіз за таким самим алгоритмом для тракторів потужністю 500 к.с.

ВСТУП

Ґрунти є важливим джерелом життєво важливих ресурсів для людства. На даний час склалась ситуація, коли наші ґрунти терплять негативний вплив, що веде до значного обмеження забезпеченості людей стратегічно необхідними ресурсами для виживання. Зростання негативного втручання людей у природні процеси привело до посилення опустелювання та деградації земель, тобто до втрати продуктивності ґрунту.

З розвитком технічного прогресу, впровадженням потужної тракторної енергетики інтенсивна дія рушіїв сучасної техніки на ґрунт викликала погіршення її властивостей, що негативно вплинуло на родючість ґрунту та врожай сільськогосподарських культур [1–2]. Особливу небезпеку становить кумулятивний ефект переущільнення ґрунту від повторюваних впливів рушіїв. Ступінь ущільнення залежить від маси трактора, типу рушія, типу ґрунту та технології виконання польових робіт.

Одним із напрямків вирішення проблеми зменшення негативного впливу на ґрунт, підвищення продуктивності сільськогосподарських робіт є удосконалення рушійних систем тракторів із метою зменшення тиску на ґрунт.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідженням впливу рушійних систем тракторів на ґрунт присвячено роботи Спіріна А.В., М.Я. Довжика О.Ю. Реброва, Антощенкова Р. В., Inge Hakansson, A. Słowińska-Jurkiewicz, H. Domażał [3-9] та інших вчених, які доводять, що в процесі обробітку сільськогосподарських культур рушій трактора впливає на фізико-механічні властивості ґрунту, в основному погіршуючи їх. На підставі досліджень встановлено, що підвищення щільності ґрунту, викликане впливом рушіїв тракторів та сільськогосподарських машин, призводить до збільшення твердості ґрунту в 2 - 3 рази. Питомий опір під час обробки орного шару після проходження тракторів підвищується на 15 - 65 % [10]. Також спостерігається зменшення мінералізації органічних речовин, доступності ресурсів для рослин, проникності ґрунту, здатності до проростання зерна, а також розвитку та проникності коренів [11].

Вирішення проблеми ущільнення ґрунтів є предметом наукових досліджень багатьох вчених [12 -16].

S. Mudarisov [12] дослідивши геометрію опорної частини гусеничного трактора прийшов до висновку, що плоска геометрія опорної частини гусеничного трактора з напівжорсткою підвіскою створює максимальний тиск на ґрунт першим та останнім опорними катками, що призводить до

збільшення ущільнення ґрунту. вдосконалення геометрії. На основі експериментальних досліджень автором було розроблено математичну модель, яка розкриває закономірність розподілу тиску по довжині гусениці. Таким чином автор довів можливість зменшення тиску на ґрунт шляхом зміни конструкції опорних гусениць, яке забезпечує раціональним розташуванням центру мас трактора.

У роботі [13] автором доведено ефективність застосування здвоєних шин і баластування трактора для зниження максимального тиску трактора на ґрунт. Автором запропоновано методику вибору маси баластних ваг для установки в дисках задніх коліс та на передню навісну систему трактора.

Ряд вчених [14 -16] теоретичним та експериментальним шляхом досліджували вплив таких параметрів, як тиск в шинах і співвідношення між радіусами передніх і задніх коліс, рисунок протектора тощо на величину тиску на ґрунт.

Як бачимо рушійна система трактора має значний вплив на характеристики його взаємодії з ґрунтом. Особливої актуальності такі дослідження набувають на сучасному етапі, коли перевагу віддають важким тракторам з потужністю 300 й більше к.с. і начною експлуатаційною вагою.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є аналіз особливостей конструкцій рушіїв сучасних тракторів значної потужності, які застосовують з метою зниження тиску на ґрунт Для досягнення поставленої цілі

- проаналізовано моделі колісних рушіїв тракторів потужності 300-500 к.с.;
- виконано розрахунок питомого тиску на ґрунт;
- проведено порівняння значень питомого тиску на ґрунт тракторів із колісними, напівгусеничними і повногусеничними рушіями потужністю 300-500 к.с.;
- виконано аналіз за таким самим алгоритмом для тракторів потужністю 500 к.с.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Найбільш поширеними є моделі сільськогосподарських тракторів на колісному ході, для яких такий ключовий елемент рушія як шини, забезпечують контакт між шасі та поверхнею дороги. Вони виконують важливі функції — сприймають вагу машини, амортизують нерівності дорожнього покриття, забезпечують зчеплення з дорогою, ефективно гальмування та стійкість під час поворотів.

Як зазначено вище, шини здатні зменшити тиск на ґрунт. Розглянемо їхні особливості. З цією метою проаналізуємо моделі шин тракторів із колісним рушієм потужністю 300 – 500 к.с..

Трактор John Deere моделі 8R 370 (рис.1) потужністю 370 к.с. У даній моделі використано широкопрофільні шини Michelin VF 710/70R42, які спеціально розроблені для тракторів із номінальною потужністю до 550 к.с., забезпечують велике тягове зусилля та захист ґрунту виконуючи польові роботи при дуже низькому тиску від 0.6 бар. Використання трактора з рушіями, що містять такі шини забезпечує зростання врожайності на 4%.



Рисунок 1 – Трактор John Deere моделі 8R 370

Для зменшення тиску в шинах і, відповідно, для збільшення плями контакту з ґрунтом використана система CTIS, яка може змінювати тиск у шинах під час руху, тим самим покращуючи прохідність автомобіля на пересіченій місцевості. Через нижчий тиск шина деформується, і одночасно збільшується площа контакту з ґрунтом.

Також у даній моделі використовуються флотаційні шини Flotation 4WD, які розроблені для роботи на м'яких ґрунтах з мінімальним тиском під час кочення. Рисунок центральної частини протектора утворює щільне взаємне зачеплення та вигнуту лінію, що забезпечує низьке спрацювання поверхонь шини на твердих покриттях.

Трактор Fendt 930 Vario (рис.2) номінальної потужності 300 к.с. із колісним рушієм. Застосовано радіальні VF/IF шини, які сприймають на 20% більше навантаження при тому ж тиску в насосі, що й звичайна радіальна шина. Шини IF/VF здатні працювати за порівняно низького тиску в шинах і витримувати великі навантаження завдяки здатності їхньої боковини працювати при значному згинанні (звідси й термін «згинання» в їхній номенклатурі) [17]. Шини IF/VF розроблені з урахуванням вимог, що виникають у зв'язку з використанням сільськогосподарської техніки, яка постійно стає більшою, важчою та потужнішою. На рис.3 зображено різницю тиску в шині Standard Ag та IF Ag.



Рисунок 2 - Трактор Fendt 930 Vario



Рисунок 3 – Тиск в шині Standard Ag та IF Ag

Трактор New Holland T8.435 з номінальною потужністю 380 к.с. (рис. 4). Рушій колісний, оснащено шинами Michelin Axiobib 2 VF або Bridgestone VT-Tractor, які знижують ущільнення ґрунту.

Шини Michelin Axiobib 2 VF є новітнім продуктом Іспанського виробника Michelin із радіальною конструкцією каркасу розроблені спеціально для сільськогосподарської техніки. Застосування шин дозволяє збільшити на 4% врожайність завдяки захисту ґрунту від ущільнення та утворення колії [18].



Рисунок 4 - Трактор New Holland T8.435

Трактор Case IH Magnum 380 (рис.5). Case IH Magnum AFS Connect – застосовує Firestone Destination Farm IF або Trelleborg TM150 VF, що забезпечують великий контакт із ґрунтом при низькому тиску.



Рисунок 5 - Трактор Case IH Magnum 380

Шини Firestone Destination Farm IF виготовлені за інноваційною технологією AD2, мають підсилений борт обода й забезпечують рівномірну площу контакту з ґрунтом. Шини мають оригінальну багатокутову конфігурацію протектора із збільшенням висоти від краю до центру колеса.

Аналіз шин колісних тракторів потужністю 300-500 к.с. відомих виробників John Deere, CLAAS, Fendt, New Holland, Case IH дозволив встановити тип шин, які виробники використовують для забезпечення збереження ґрунтів за рахунок вирішення проблеми зменшення тиску на ґрунт. Деякі особливості шин приведено нижче (табл. 1).

Таблиця 1 Шини, як засіб вирішення проблеми ґрунтозбереження

№ за порядком	Тип шин	Коротка характеристика	Суттєва перевага
1	Широкопрофільні (flotation tires)	Велика ширина і площа контакту з ґрунтом	Зменшують питомий тиск, підходять для м'яких ґрунтів
2	Радіальні шини з низьким тиском (IF / VF технології)	IF — Increased Flexion, VF — Very High Flexion	Дозволяють працювати при зниженому тиску без втрати вантажопідйомності
3	Шини з системою регулювання тиску (CTIS)	Можна з кабіни змінювати тиск залежно від умов	Оптимізує зчеплення й знижує ущільнення ґрунту

Для більш поглибленого аналізу нами виконано розрахунок питомого тиску на ґрунт для кожної з наведених моделей тракторів.

Для розрахунку використано показники виробників:

- маса трактора (без додаткового баласту);
- робочий тиск у шинах.

Величина площі плями контакту визначалась як відношення ваги трактора до величини робочого тиску.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати оцінювання площі плями контакту шин із ґрунтом і величини питомого тиску наведено в таблиці 2.

Графічна інтерпретація отриманих результатів подана на рис. 6.

Таблиця 2 – Результати визначення питомого тиску а ґрунт

Виробник	Модель	Маса (кг)	Тиск в шинах (бар)	Орієнтована контактна площа (м ²)	Питомий тиск (кг/см ²)
John Deere	8R 370	12 700	1.2	1.038	1.224
John Deere	8R 370	12 700	0.8	1.557	0.816
Fendt	930 Vario	10 260	1.2	0.839	1.224
Fendt	930 Vario	10 260	0.8	1.258	0.816
New Holland	T8.435	11 880	1.2	0.971	1.224
New Holland	T8.435	11 880	0.8	1.457	0.816
Case IH	Magnum 380	14 605	1.2	1.194	1.224
Case IH	Magnum 380	14 605	0.8	1.791	0.816
CLAAS	Axion 960 Terra Trac	16 200	1.2	1.324	1.224
CLAAS	Axion 960 Terra Trac	16 200	0.8	1.987	0.816

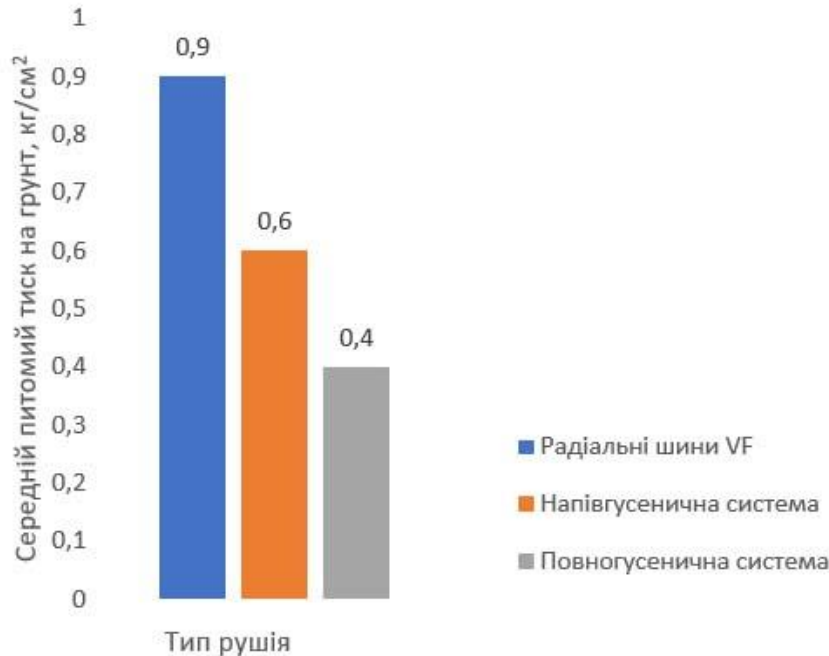


Рисунок 6 – Середній питомий тиск на ґрунт для різних типів рушіїв тракторів із номінальною потужністю 300-500 к.с.

Також були проведені розрахунки для тракторів із півгусеничними повногусеничними рушіями. Порівняння отриманих результатів наведено на рис. 6. Для аналізу розглядалися гусеничні системи Rowtrac (рис. 7), SmartTrac



Рисунок 7 – Трактор на півгусеничному ході системи Rowtrac

Також нами виконано аналіз ходових систем тракторів потужністю 500 к.с. Виконано обрахунки для моделей відомих виробників тиску на ґрунт. Результати наведено нижче в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати оцінювання площі плями контакту та тиску для тракторів потужністю 500 к.с.

Модель трактора	Маса, кг	Колеса 1.2 бар, м ²	Колеса 0.8 бар, м ²	Гусениця 40 кПа, м ²	Гусениця 49 кПа, м ²
Case IH Steiger 620 Quadtrac	22 120	1.808	2.712	5.425	4.428
Питомий тиск, кг/см ²	-	1,223	0,8156	0,4077	0,0479
John Deere 9R 640	21 174	1.731	2.596	5.193	4.240
Питомий тиск, кг/см ²	-	1,2232	0,8156	0,4077	0,4994
New Holland T9.670	25 401	2.077	3.115	6.230	5.086
Питомий тиск, кг/см ²	-	1,2229	0,8154	0,4077	0,4994
CLAAS Xerion 5000	16 570	1.355	2.032	4.064	3.317
Питомий тиск, кг/см ²	-	1,2229	0,8155	0,4077	0,4995
Challenger MT875E	19 321	1.579	2.369	4.738	3.868
Питомий тиск, кг/см ²	-	1,2236	0,8156	0,4077	0,4995

Як видно з таблиці, перехід із колісної на напівгусеничну або гусеничну ходову систему суттєво збільшує площу контакту з ґрунтом і, відповідно, приводить до зменшення питомого тиску на ґрунт, зменшуючи ущільнення.

ВИСНОВКИ

1. Використання напівгусеничних або гусеничних рушіїв для важких тракторів дозволяє суттєво збільшити площу контакту, в середньому у 2,5–3 рази, з ґрунтом у порівнянні з колісними.

2. Зменшення тиску в шинах з 1.2 до 0.8 бар дозволяє також зменшити тиск на ґрунт, в середньому на 33–40%.

3. За умови досягнення мінімально можливого ущільнення ґрунту рекомендовано застосовувати півгусеничні або гусеничні системи Rowtrac, SmartTrac.

4. За потреби значного зменшення тиску на ґрунт рекомендовано для колісних рушіїв обирати шини широкого профілю (flotation), а також VF-шини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Zoran I. Mileusnić, Elmira Saljnikov, Rade L. Radojević, Dragan V. Petrović, Soil compaction due to agricultural machinery impact, Journal of Terramechanics, Volume 100, 2022, Pages 51-60, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>.

2. João Augusto Coblinski, Sylwia Pindral, Grzegorz Siebielec, Soil resilience to degradation in Poland by 2050 under climate and land use change, CATENA, Volume 260, 2025, 109463, ISSN 0341-8162,

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109463>.

3.Спірін А.В., Кучковський С.М. Взаємодія колеса трактора з ґрунтом. Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 64)" / Збірник тез доповідей: випуск 64 (м. Тернопіль, 10 грудня 2021 р.). –Тернопіль. – 2021. С.131 – 133.

4.Довжик М.Я. Напряженно-деформированное состояние грунта под следом колеса транспортного средства /М.Я. Довжик, Б.Я. Татьяначенко, А.А. Соларев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. – Минск: БГАТУ, 2013. – С. 57-62.

5.Ребров О. Ю. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів. / О.Ю. Ребров, Б.І. Кальченко, В.А. Макаров та ін. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле – та тракторобудування: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 1 (2022). – С. 36-43.

6.Антощенко Р. В., Галич І. В., Череватенко Г. І. Динаміка та енергетика руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням профілю опорної поверхні: монографія. – Харків: ДБТУ, 2024. – 100 с.

7.Inge Håkansson, Ward B. Voorhees, Hugh Riley, Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes, Soil and Tillage Research,

8.V. 11, Issues 3–4, 1988, P. 239-282, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7).

9.A. Słowińska-Jurkiewicz, H. Domażał, The structure of the cultivated horizon of soil compacted by the wheels of agricultural tractors, Soil and Tillage Research, V. 19, Issues 2–3, 1991, P. 215-226, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90089-G](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90089-G).

10.Кушнарєв, А.С. Механіко-технологічні основи обробки ґрунту / А.С. Кушнарєв, В.И. Кочев. -Киев: Урожай, 1989. -144 с.

11.H. Mohieddinne, A. Yatskul, C. Ugarte, at all. Trade-off between agronomical and energetical performances during barley sowing varying adjustable parameters in a tractor-tire-tool system, Soil and Tillage Research, V. 226, 2023, 105582. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105582>.

12.S. Mudarisov, I. Gainullin, I. Gabitov at all. Soil compaction management: Reduce soil compaction using a chain-track tractor. Journal of Terramechanics, V. 89, 2020, P. 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.02.002>

13.О. Ребров. Баластування та здвоєння шин колісних сільськогосподарських тракторів за умов виконання агроекологічних норм дії на ґрунт. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле – та тракторобудування: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 2 (2022). – С. 36-43. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.11>

14.L. Angelucci, M. Varani, F. Pinet at all. The role of tyres and soil conditions in enhancing the efficiency of agricultural tractors. Soil and Tillage Research, V. 251, 2025, 106570, <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106570>.

15.A. Grecenko, P. Prikner. Tire rating based on soil compaction capacity. Journal of Terramechanics, V. 52, 2014, P. 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.08.001>.

16.A.C. Bailey, R.L. Raper, T.R. Way, E.C. Burt, C.E. Johnson. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. Journal of Terramechanics, V. 33, Issue 1, 1996, P. 1-11, [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(96\)00004-3](https://doi.org/10.1016/0022-4898(96)00004-3).

REFERENCES

1. Zoran I. Mileusnić, Elmira Saljnikov, Rade L. Radojević, Dragan V. Petrović, Soil compaction due to agricultural machinery impact, Journal of Terramechanics, Volume 100, 2022, Pages 51-60, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>.

2.J. A. Coblinski, Sylwia Pindral, Grzegorz Siebielec, Soil resistance to degradation in Poland until 2050 under conditions of climate change and land use, CATENA, vol. 260, 2025, 109463, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109463>.

3.Spirin A.V., Kuchkovsky S.M. Interaction of tractor wheels with soil. Materials of the International Scientific Internet Conference “Information Society: Technological, Economic, and Technical Aspects of Formation (Issue 64)” / Collection of abstracts: Issue 64 (Ternopil, December 10, 2021). –Ternopil. – 2021. P. 131–133.

4. Dovzhyk M.Ya. Stress-strain state of soil under the wheel track of a vehicle / M.Ya. Dovzhyk, B.Ya. Tatiachenko, A.A. Solarev // *Scientific and technical progress in agricultural production*. – Minsk: BGATU, 2013. – P. 57-62.
5. Rebrov O. Yu. Estimative analysis of the impact of wheeled agricultural tractor running systems on soil. / O.Yu. Rebrov, B.I. Kalchenko, V.A. Makarov et al. // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering: Collection of Scientific Papers*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023. – No. 1 (2022). – Pp. 36-43.
6. Antoshchenko R. V., Galich I. V., Cherevatenko G. I. Dynamics and energy of the movement of a machine-tractor unit taking into account the profile of the supporting surface: monograph. – Kharkiv: DBTU, 2024. – 100 p.
7. Inge Håkansson, Ward B. Voorhees, Hugh Riley, Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes, *Soil and Tillage Research*,
8. V. 11, Issues 3–4, 1988, P. 239-282, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7).
9. A. Słowińska-Jurkiewicz, H. Domażał, The structure of the cultivated horizon of soil compacted by the wheels of agricultural tractors, *Soil and Tillage Research*, V. 19, Issues 2–3, 1991, P. 215-226, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90089-G](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90089-G).
10. Kushnarev, A.S. Mechanical and technological foundations of soil cultivation / A.S. Kushnarev, V.I. Kochev. -Kyiv: Urozhay, 1989. -144 p.
11. H. Mohieddinne, A. Yatskul, C. Ugarte, at all. Trade-off between agronomical and energetical performances during barley sowing varying adjustable parameters in a tractor-tire-tool system, *Soil and Tillage Research*, V. 226, 2023, 105582. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105582>.
12. S. Mudarisov, I. Gainullin, I. Gabitov at all. Soil compaction management: Reduce soil compaction using a chain-track tractor. *Journal of Terramechanics*, V. 89, 2020, P. 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.02.002>
13. O. Rebrov. Ballast and doubling of tires of wheeled agricultural tractors under the conditions of fulfilling agroecological norms of action on the soil. // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor construction: collection of scientific works - Kharkiv: NTU "KhPI", 2023. - No. 2 (2022). - P. 36-43. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.11>*
14. L. Angelucci, M. Varani, F. Pinet at all. The role of tyres and soil conditions in enhancing the efficiency of agricultural tractors. *Soil and Tillage Research*, V. 251, 2025, 106570, <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106570>.
15. A. Grecenko, P. Prikner. Tire rating based on soil compaction capacity. *Journal of Terramechanics*, V. 52, 2014, P. 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.08.001>.
16. A.C. Bailey, R.L. Raper, T.R. Way, E.C. Burt, C.E. Johnson. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. *Journal of Terramechanics*, V. 33, Issue 1, 1996, P. 1-11, [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(96\)00004-3](https://doi.org/10.1016/0022-4898(96)00004-3)

Holotiuk M., Nalobina O., Bundza O. Analysis of the influence of traction system elements of heavy tractors on soil pressure

Soil compaction is a physical process of soil degradation that reduces its porosity and, as a result, intensifies erosion processes and decreases crop yields. Plants grown on compacted areas exhibit weaker development and lower vitality. This occurs because gas exchange in the soil deteriorates, affecting the availability of oxygen and other gases to plant roots. Modern crop production practices show that the widespread use of heavy tractors in fields increases both the intensity and frequency of mechanical impact on the soil. Repeated movement of agricultural machinery leads to significant compaction of the soil to a depth of up to 100 cm, while machine tracks may occupy up to 80% of the cultivated area. Under the influence of heavy machinery, soil density has increased by 20–40%. Reducing soil compaction is therefore one of the key strategies for sustainable land use. Improving the running systems of machines and implements, as well as reducing their overall weight, plays a crucial role in this process.

This study established that manufacturers of heavy, high-power tractors are constantly seeking ways to reduce the specific pressure exerted on the soil, particularly through modifications in design parameters, production technologies, and materials used in drive components. The efficiency of such tractors depends significantly on the proper selection of wheel configurations, especially during operations that require minimal soil impact.

The study analyzed the structural features of traction systems in modern high-power tractors designed to reduce ground pressure. In particular, models of wheeled tractors with an engine power of 300–500 hp were examined; the specific ground pressure was calculated; and the obtained values for tractors with wheeled, semi-tracked, and fully tracked propulsion systems (in the 300–500 hp range) were compared. A similar analysis was also carried out for tractors with a power output of 500 hp.

ГОЛОТЮК Микола Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3661-4437>

НАЛОБІНА Олена Олександрівна, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри агроінженерії, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: o.o.nalobina@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1661-7331>

БУНДЗА Олег Зіновійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: o.z.bundza@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3770-0273>

Mykola HOLOTIUK, PhD in Eng., associate Professor of the Department of Agricultural Engineering, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3661-4437>

Olena NALOBINA, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Agricultural Engineering, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: o.o.nalobina@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1661-7331>

Oleh BUNDZA, PhD in Eng., associate Professor of the Department of Agricultural Engineering, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: o.z.bundza@nuwm.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3770-0273>

Дата надходження статті до видання: 22.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1919

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ ПІДВІСКИ, АМОРТИЗАТОРА, НА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ДІАГНОСТУВАННЯ

Амортизатори в автомобілі є ключовим елементом підвіски, який забезпечує комфорт та безпеку під час руху. Вони працюють у парі з пружним пристроєм, поглинаючи енергію ударів та поштовхів, що виникають при наїзді на нерівність дороги. Амортизатор запобігає розгойдуванню кузова, зменшує вібрацію та забезпечує більш плавний рух кузова. У процесі експлуатації з напрацюванням параметри амортизатора погіршуються, знижується безпека, комфорт, продуктивність автомобіля, погіршується стійкість, збільшується гальмівний шлях, прогресує розгойдування кузова при русі, з'являються стукіт та шуми у підвісці, нерівномірне зношування шин. Це призводить до необхідності періодично контролювати стан амортизаторів засобами діагностики. Широко застосовується безрозбірна діагностика, оскільки монтажні-демонтажні роботи мають велику трудомісткість, вимагають застосування спеціального обладнання та кваліфікованих спеціалістів. На практиці використовується стендове діагностування із застосуванням збудження підвіски періодичним сигналом, при цьому, великою мірою, тестується не амортизатор, а підвіска загалом. Тому, при тестуванні підвіски у зборі, у висновку про тестування амортизатора міститься інформація про інші компоненти підвіски. Це є джерелом помилок під час діагностування амортизаторів. Компоненти підвіски можуть мати як лінійні, так і нелінійні характеристики, причому ті й інші через наявність помилок і несвоєчасну заміну амортизатора можуть обмежувати його фактичну працездатність. У цій роботі, із залученням методу імітаційного моделювання, розглядається вплив нелінійних характеристик, таких як сухе тертя та люфт у підвісці, на похибку діагностування амортизатора.

Ключові слова: амортизатор, діагностування, нелінійні характеристики, похибки, моделювання.

ВСТУП

Підвіска автомобіля здійснює дві найважливіші функції – комфорт та безпеку руху. Комфорт забезпечується правильною характеристикою "швидкість - сила" протягом ходу штока амортизатора при стисненні та віддачі, а безпека - стабільністю контакту шини з дорогою. Характеристика "швидкість - сила" у підвісці автомобіля формується тертям різних видів. Головним чином, це тертя в амортизаторах, пружних елементах, шарнірах важелів підвіски, рульового приводу, шинах. Основні джерела згасання у підвісці: постійне (сухе тертя) у шарнірах підвіски та рульового приводу; тертя, що залежить від відносної швидкості кузова та колеса, що має місце у гідравлічних амортизаторах; міжмолекулярне тертя; тертя, пов'язане з шиною. Тертя всіх видів, за винятком тертя в амортизаторах, негативно впливають на коливання автомобілів, тому в сучасних автомобілях ці види тертя зменшують до мінімуму. З пробігом автомобіля різні види тертя не залишаються незмінними. Більшість видів діють паралельно тертю в амортизаторах, тому визначення їх величин, включаючи тертя в амортизаторах, пов'язане з певними труднощами.

Існує такий стан несправного амортизатора, у якому зміна напрямку руху штока початковий час взагалі не супроводжується зусиллям, тобто має місце люфт. Цей режим і цей стан також цікавий для діагностування амортизатора та оцінки похибок при формулюванні діагнозу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відомо достатню кількість методів та засобів діагностування підвісок/амортизаторів, що відрізняються функціональними та метрологічними властивостями [1]. Доступним та найпростішим у використанні є «Тестер амортизаторів на автомобілі SAT USB M-TRONIC», що приводиться в дію м'язовою силою оператора [2]. Як діагностичний параметр пропонувалося відношення двох сусідніх амплітуд. Було знято з виробництва через низьку точність через велику залежність результату діагностування від величини сухого тертя в підвісці.

Найбільш популярний метод та засоби діагностування амортизаторів в Україні свого часу було запропоновано «Асоціацією виробників амортизаторів у Європі» – метод EuSAMA [3]. Тут як діагностичний параметр використовується відношення мінімального за випробування динамічного зусилля колеса на опорну поверхню до статичного зусилля. Є пропозиції щодо вдосконалення методу, зокрема з метою зниження похибок від дії сторонніх факторів [4,5].

У резонансному методі (BOGE, MAXA) як діагностичний параметр використовується амплітуда коливання невіднесеної маси, відсотковий коефіцієнт загасання i , в пізніших версіях, відносний коефіцієнт демпфірування [6,7]. Модифіковані версії методу демонструють зниження похибок методу, у тому числі за рахунок зниження впливу сторонніх чинників.

Останнім часом завдяки розвитку техніки обробки сигналів з'явилися такі методи діагностування амортизаторів:

- метод фазового кута [8];
- ТЕТА - метод (відносний коефіцієнт демпфірування) [9];
- метод половинного кута (потужності) [10].

Першою особливістю дослідження методів є аналіз відповідних діагностичних параметрів, включаючи однозначність, чутливість, похибку від дії сторонніх факторів [7,11]. Основним методом дослідження прийнято моделювання, причому використовуються дво-, тримасові моделі «чверті автомобіля» другого та третього порядків [12,13, 14].

Другою особливістю досліджень слід назвати ігнорування впливу нелінійних характеристик компонентів на результати діагностування підвіски/амортизатора. Винятком є роботи авторів Lozia Z. [15], Zdanowicz, P, [16], які запровадили моделі нелінійних характеристик пружного пристрою підвіски і шини. В результаті дослідження впливу сухого тертя в підвісці на результати діагностування амортизаторів методом EuSAMA автором Zdanowicz, P, було показано, що автомобілі з високими значеннями сухого тертя в підвісках досягають хороших або навіть дуже хороших результатів у тесті, навіть якщо демпфуючі елементи підвісок повністю зношені. Це вказує на необхідність урахування сухого тертя під час діагностування.

Люфт в амортизаторі виникає при нестачі гідравлічної рідини, перегріві або при неправильному монтажі. При тестуванні на стенді проявляється у вигляді стукотів.

Незважаючи на суттєвий вплив нелінійних характеристик компонентів підвіски на результати діагностування, дослідження мають фрагментарний характер та стосуються окремих методів діагностування. Ця ситуація склалася через наявність відомих складнощів інтегрування лінійних диференціальних рівнянь моделі з нелійними елементами у загальному вигляді. Вихід із ситуації можливий в накопиченні приватних рішень із наступним узагальненням. Одним із таких приватних рішень є матеріал цієї статті.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цієї роботи є визначення амплітудної, фазової реакції невіднесорених частин при тестуванні автомобіля на стенді, залежно від зміни нелінійних параметрів підвіски автомобіля при навантаженні на вісь до 740 кг. Як нелінійні параметри використовувалися сухе тертя і люфт у підвісці. Зі збільшенням пробігу дані параметри не залишаються постійними, як і їх вплив на точність діагнозу. Знання залежностей «нелінійні параметри» - амплітудні, фазові параметри при стендовому тестуванні дозволяють оцінити похибку конкретного методу та його застосування для певних умов.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як основний метод дослідження прийнято моделювання. У численних дослідженнях підтверджено високий рівень адекватності імітаційної моделі. Насправді двомасова модель є класикою теорії динаміки механічних систем. З іншого боку, моделювання дозволяє суттєво знизити вартість дослідження внаслідок виключення трудомісткої розбирання-складання підвіски та неможливості після чергового складання з повною достовірністю повернути сполучення до початкових параметрів. Моделювання проводилося в часовій області у середовищі MATLAB SIMULINK, рисунок 1. Як об'єкт досліджень був обраний автомобіль SKODA FABIA 1,6. Використовувалася двомасова модель автомобіля [17], в якій модулі b1 та Sign-S були замінені на бібліотечні Covlumb & Viscons Fridom та Backlash відповідно. Перший реалізує нелінійну функцію "сухе тертя", другий - нелінійну функцію "люфт".

Люфт моделювався за допомогою зони нечутливості, тобто частини коефіцієнта демпфірування зі значенням, що дорівнює нулю.

Допущення, прийняті у розрахунку:

- ізолювана «чверть підвіски» автомобіля;
- двомасова модель з двома ступенями свободи;
- лінійна характеристика пружних елементів c1, c2.

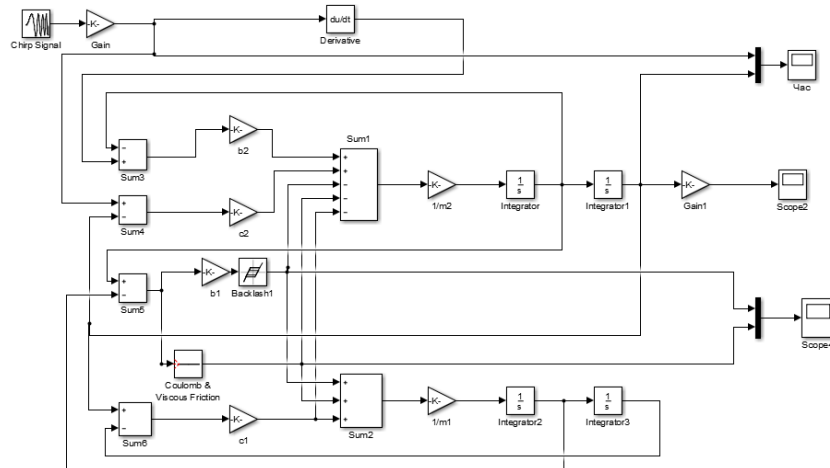


Рисунок 1. Комп'ютерна модель.

Моделювання проводилося для шести значень сухого тертя та шести значень зони нечутливості (люфту) при коефіцієнті демпфірування, що відповідає хорошему, задовільному та незадовільному стану амортизатора, таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку представлені в таблиці 2.

Таблиця 1 - Відповідність коефіцієнтів EuSAMA та коефіцієнтів демпфірування амортизаторів при навантаженні на вісь 740 кг: [18]

Оцінка: верхній край діапазону:	Коефіцієнт EuSAMA, %	Коефіцієнт демпфування амортизатора, Н*с/м
«Добре» (Зона А)	70+	1460+
«Досить» (Зона В)	50	700
«Недостатньо» (Зона С)	30	430
«Погано» (Зона D)	20	20
«Погано» (Зона Е)	0-	0

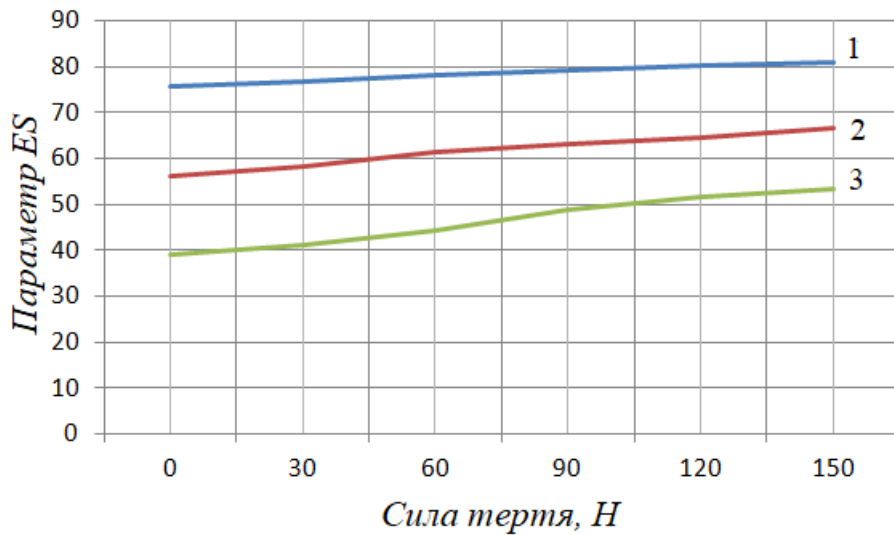
Результати моделювання представлені на рисунках 2 – 9.

Таблиця 2 - Вихідні дані для розрахунку

Показник	Значення	Одиниця виміру
Амплітуда нерівності	$A = 0,003$	м
Маса кузова	$m1 = 376$	кг
Жорсткість пружини	$c1 = 25000$	Н/м
Демпфірування амортизатора	$b1 = 1460...430$	Н*с/м
Підресорена маса	$m2 = 35$	кг
Жорсткість шини	$c2 = 273$	кН/м
Демпфірування шини	$b2 = 200$	Н*с/м
Сухе тертя в підвісці	$s = 0...150$	Н
Люфт (зона нечутливості)	$Y=0...250$	Н*с/м

Парціальні власні частоти підвіски: $\omega1 = 1,3$ Гц; $\omega2=14$ Гц.

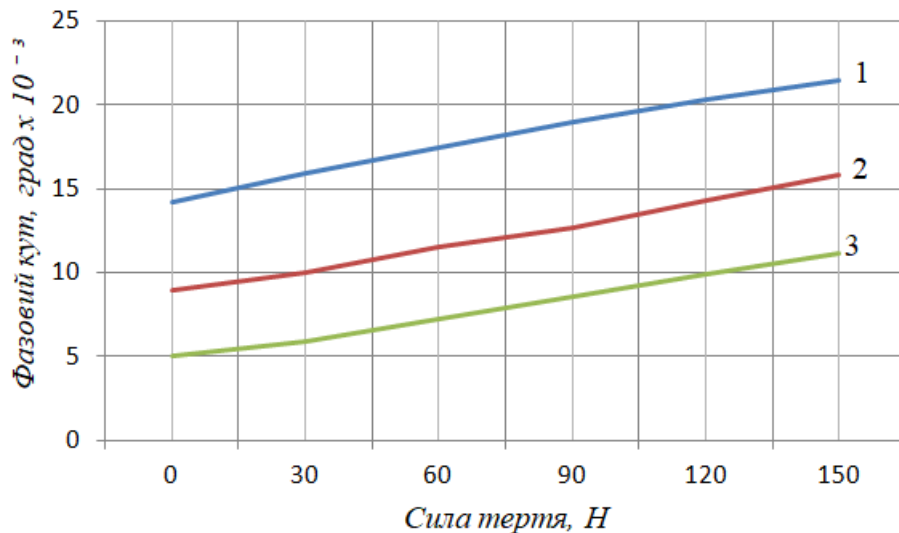
На рисунках 2 – 5 представлені залежності діагностичних параметрів деяких методів від величини сухого (постійного тертя) у підвісці за трьох значень коефіцієнта демпфірування амортизатора.



1 - $b1=1460 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 2 - $b1 = 700 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 3 - $b1 = 430 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$

Рисунок 2. Вплив сухого тертя на «параметр EuSAMA» при різних значеннях коефіцієнта демпфування амортизатора

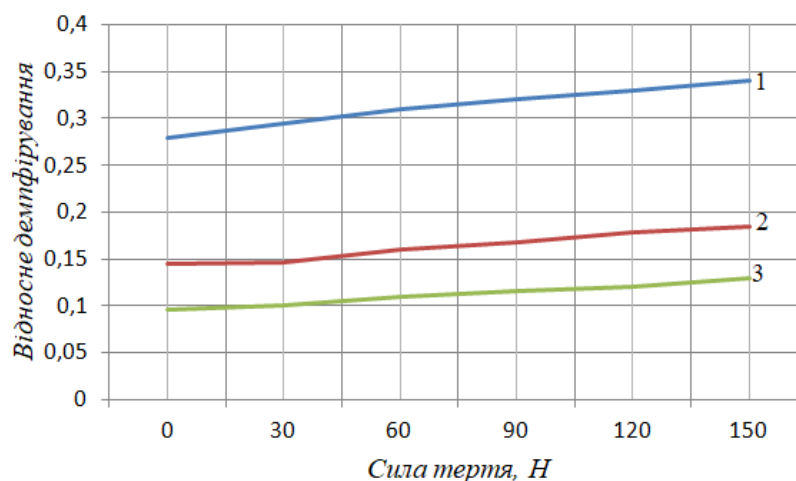
Як випливає з рисунка 2, зі збільшенням значень сухого тертя, «параметр EuSAMA» зростає майже лінійно, причому зі зменшенням коефіцієнта демпфування чутливість «параметра EuSAMA» зростає.



1 - $b1=1460 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 2 - $b1 = 700 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; 3 - $b1 = 430 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$

Рисунок 3. Вплив сухого тертя на параметр «фазовий кут» за різних значень коефіцієнта демпфування амортизатора

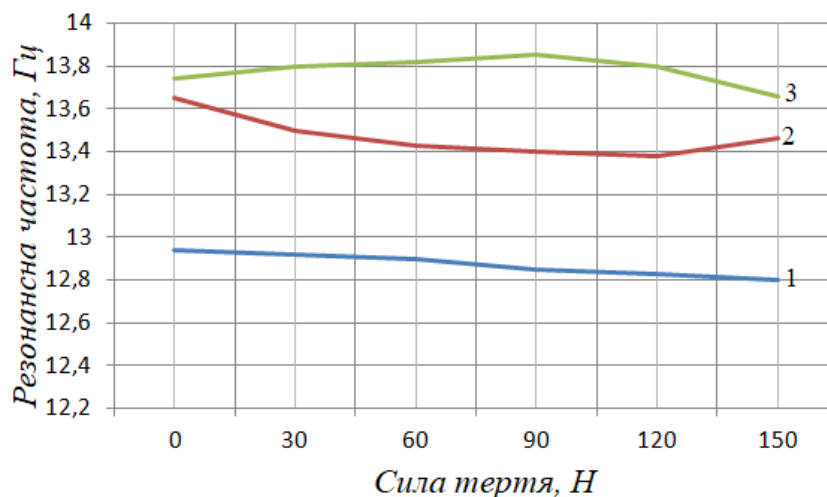
На рис.3 параметр «фазовий кут» демонструє однакову чутливість всім значенням коефіцієнта демпфування амортизатора, про що свідчить однаковий нахил кривих. Абсолютна величина чутливості максимальна серед діагностичних параметрів, що розглядаються, таблиця 3.



1 – $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$.

Рисунок 4. Вплив сухого тертя на параметр «відносне демпфірування» за різних значень коефіцієнта демпфірування амортизатора

Рисунок 4 ілюструє майже лінійне зростання відносного демпфірування зі зростанням сухого тертя при всіх значеннях коефіцієнта чутливості.

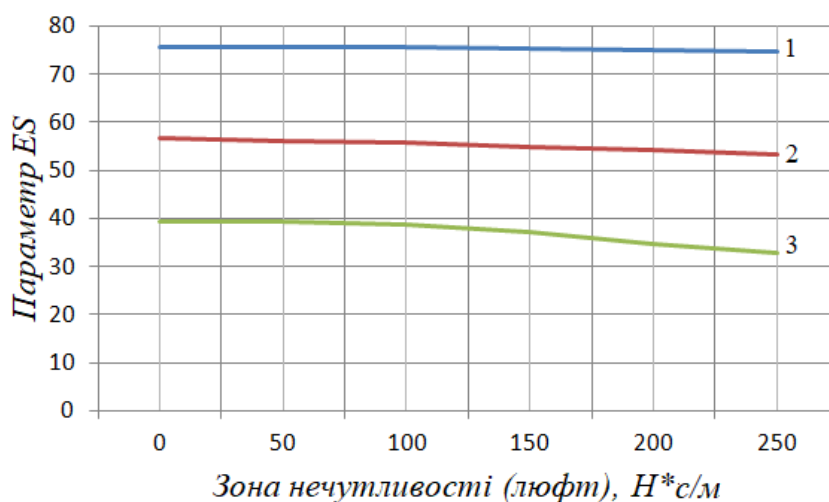


1 – $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$.

Рисунок 5. Вплив сухого тертя на резонансну частоту невіднесеної маси при різних значеннях коефіцієнта демпфірування амортизатора

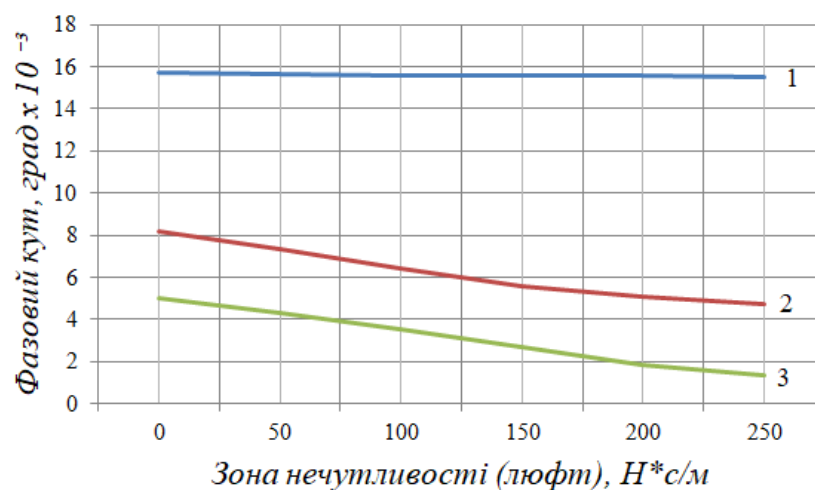
На рисунку 5 представлена залежність резонансної частоти невіднесеної маси від сухого тертя. Резонансна частота не застосовується як самостійний діагностичний параметр, але може бути використана у складних випадках як додаткова інформація.

На рисунках 6 – 9 представлені залежності діагностичних параметрів від зони нечутливості (люфту) у підвісці за трьох значень коефіцієнта демпфірування амортизатора.



1 - $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$

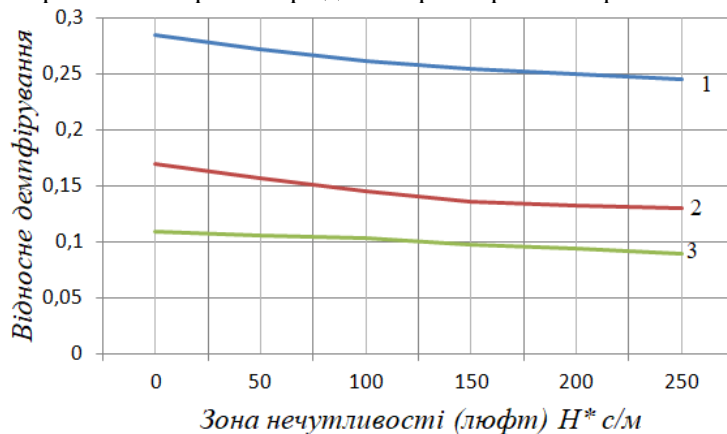
Рисунок 6. Вплив зони нечутливості (люфту) на параметр EuSAMA при різних значеннях коефіцієнта демпфірування амортизатора



1 - $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$

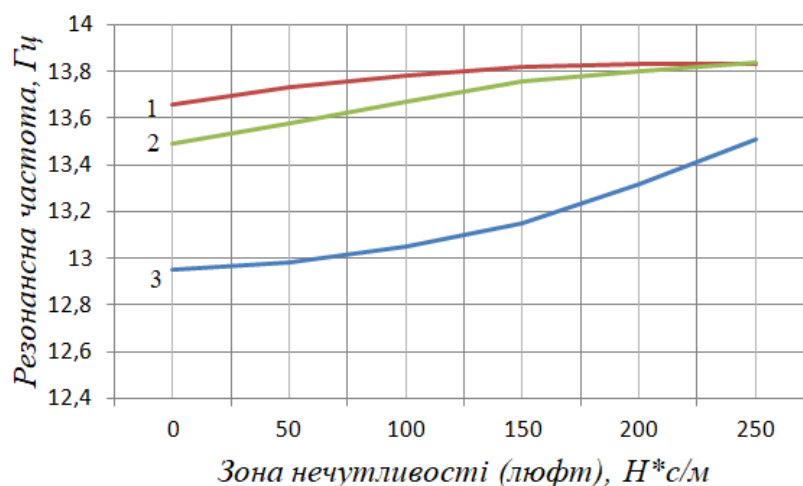
Рисунок 7. Вплив зони нечутливості (люфту) на параметр «фазовий кут» за різних значень коефіцієнта демпфірування амортизатора

На рисунках 6,7,8 показано, що залежності діагностичних параметрів від ширини зони нечутливості (величини люфта) майже лінійні та їх значення знижуються зі збільшенням люфту. Залежність несуттєва для справного амортизатора для «параметра ES» і фазового кута.



1 - $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$

Рисунок 8. Вплив зони нечутливості (люфту) на параметр «відносне демпфірування» за різних значень коефіцієнта демпфірування амортизатора



1 – $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$; 2 - $b_1 = 700 \text{ Н * с / м}$; 3 - $b_1 = 430 \text{ Н * с / м}$

Рисунок 9. Вплив зони нечутливості (люфту) на резонансну частоту невіднесеної маси при різних значеннях коефіцієнта демпфірування амортизатора

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зведена інформація про чутливість діагностичних параметрів до зміни сухого тертя у підвісці та зони нечутливості (люфту) представлена в таблицях 3,4.

Таблиця 3 – Коефіцієнти чутливості діагностичних параметрів до зміни сухого тертя у підвісці

Параметр	Коефіцієнти чутливості при коефіцієнті демпфірування:		
	1460	700	430
ES	0,0145	0,0266	0,1023
Фазовий кут	0,0596	0,1049	0,1317
Відносне демпфірування	0,0508	0,0875	0,1003

Таблиця 4 – Чутливість діагностичних параметрів до зміни зони нечутливості (люфт) у підвісці.

Параметр	Коефіцієнти чутливості при коефіцієнті демпфірування:		
	1460	700	430
ES	-0,0046	-0,0091	-0,0459
Фазовий кут	-0,0042	-0,1376	-0,1733
Відносне демпфірування	-0,0294	-0,0627	-0,0564

Примітка: знак «-» свідчить про спадання функції.

Коефіцієнт чутливості визначався як відношення різниці двох сусідніх значень до меншої їх. У таблиці наведено максимальне значення коефіцієнта чутливості, обране з ряду значень при певному коефіцієнті демпфірування.

Як випливає з таблиці, мінімальний вплив сухого тертя схильний до діагностичного «параметра ES» – метод EuSAMA. Мінімальний вплив також притаманний всім діагностичним параметрам при справній підвісці з $b_1=1460 \text{ Н*с/м}$. В інших умовах параметри «фазовий кут» та «відносне демпфірування» мають приблизно однакову залежність від величини сухого тертя.

«Параметр ES» демонструє мінімальну залежність також і від люфта в підвісці, таблиця 4. Найбільшою мірою впливу люфту піддається параметр «фазовий кут». Параметр «відносне демпфірування» при цьому показує помірну залежність від люфту у підвісці та слабку залежність від стану амортизатора при фіксованому значенні люфту.

Зі зростанням зони нечутливості (люфт) підвіски резонансна частота невіднесорених частин також зростає, рис.9.

У таблиці 5 представлені максимальні значення відносної похибки діагностичних параметрів для обох видів нелінійних елементів за тих же коефіцієнтів демпфірування, що й у попередній таблиці. У всіх випадках відносна похибка визначалася на межі діапазону, при цьому як друге діюче значення приймалося значення параметра при нульовому значенні нелінійних елементів.

Таблиця 5. Максимальні значення відносної похибки діагностичних параметрів, %.

Нелінійний елемент	Діагностичний параметр	Коефіцієнт демпфірування:		
		1460	700	430
Суше тертя	Параметр EU	6,96	17,95	36,57
	Фазовий кут	51,41	75,55	123,40
	Відносне демпфірування	21,41	26,89	28,33
Зона нечутливості (люфт)	Параметр EU	1,52	6,144	16,98
	Фазовий кут	1,55	35,82	73,25
	Відносне демпфірування	14,11	23,53	7,95

Як випливає з таблиці, сухе тертя та зона нечутливості (люфт) максимально впливає на діагностичний параметр «фазовий кут». Дані таблиці 5 в окремих випадках можуть бути основою визначення ймовірності формулювання неправильного висновку при тестуванні підвіски.

ВИСНОВКИ

Нелінійні характеристики компонентів підвіски істотно впливають на величину діагностичних параметрів, тим самим викликаючи похибки при діагностуванні.

Суше тертя в підвісці викликає зростання діагностичних параметрів, що може викликати переоцінку властивостей амортизатора з наступною рекомендацією експлуатувати несправний амортизатор.

Зворотний ефект викликає нелінійний параметр – зона нечутливості (люфт) підвіски. З її збільшенням значення діагностичних параметрів знижуються, в результаті можлива недооцінка властивостей демпфірування амортизатора, тобто його надмірна заміна.

Суше тертя та зона нечутливості (люфт) у підвісці максимально впливає на діагностичний параметр «фазовий кут».

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. Тестер амортизаторов на автомобиле [SAT USB M-TRONIC](https://m-tronic-dt.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=1&Itemid=6&lang=ru) : вебсайт. URL: https://m-tronic-dt.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=1&Itemid=6&lang=ru (дата звернення 08.07.2025)
3. EuSAMA TS-02-76, code (1976) ‘Recommendation for performance test specification of car vehicle suspension testing system’, European Shock Absorber Manufacturers Association.
4. 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
5. Arbeláez, J.J., Marín, J.P. and Calle, T. (2007) ‘Modelado, diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la adhesión en la evaluación en suspensiones de vehículos livianos bajo la norma European Shock Absorber Manufacturers Association (EuSAMA)’, 8th Iberoamerican Congress of Mechanical Engineering, October, Vol. 1, No. 1, pp.141–150.
6. Stoßdämpferprüfstand LON-SA2D/FWT für PKW und Transporter bis 1,1 t Achslast verstärkte Version bis 2,0 t Achslast. Bedienungsleitung. 3. Ausgabe, MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG. 2003.
7. Tomasz L. Stańczyk, Rafał Jurecki. Analiza porównawcza metod badania amortyzatorów hydraulicznych. - Zeszyty naukowe instytutu pojazdów 4(100)/2014 pp 25-45.
8. Suspension tester and method. Patent USA 5369974A, приор.1992-11-10, публ. 1994-12-06.
9. Описание типа средства измерений. вебсайт. URL: <https://media.belgim.by/grsi/11157.pdf> (дата звернення 24.01.2025).

10. Calvo J.A., San Román J.L., Alvarez-Caldas C.: Procedure to verify the suspension system on periodical motor vehicle inspection. *International Journal of Vehicle Design*. 2013, 63(1), 1–17, DOI: 10.1504/IJVD.2013.055497
11. Gardulski J., Badania diagnostyczne amortyzatorów. - *DIAGNOSTYKA'2* (38)/2006, pp 187-198.
12. Losia Z. Application of modelling and simulation to evaluate the theta method used in diagnostics of automotive shock absorbers/ *Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji* · June 2022 DOI: 10.14669/AM/150823
13. Lozia, Z., Zdanowicz, P. (2018). Simulation assessment of the impact of inertia of the vibration plate of a diagnostic suspension tester on results of the EUSAMA test of shock absorbers mounted in a vehicle. *KONMOT 2018 Conference. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 421. 022018 IOP Publishing DOI 10.1088/1757-899X/421/2/022018.
14. 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. DOI 10.36910/automash.v2i21.1213
15. Zbigniew Lozia and Piotr Zdanowicz. Simulation assessment of the half-power bandwidth method in testing shock absorbers. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0011> Received Jul 13, 2020; accepted Sep 28, 2020.
16. ZDANOWICZ, P. Comparative assessment of vertical vibrations of a vehicle on the road and during the EUSAMA test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 421(2) [accessed 2020-08-07]. ISSN 1757-899X. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/421/2/022045/pdf>
17. 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
18. Дитятьєв О.В. Вплив нетестованого колеса осі на похибку визначення демпфування колеса, що тестується методом EuSAMA - «Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті». *Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2024.– №1(22).– С. 139 – 146.* DOI 10.36910/automash.v1i22.1354.

REFERENCES

1. *Tekhnicheskoe obsluzhyvanye, remont y khraneniye avtotransportnykh sredstv*: Uchebnyk: V 3 kn. K.: Vyshcha shk., 1991. – Kn. 1. Teoretycheskiye osnovy. / V.E. Kanarchuk, A.A. Ludchenko, Y.P. Kurnykov, Y.A. Luik. – 359 s. : yl.
2. Tester amortyzatorov na avtomobyle SAT USB M-TRONIC : vebsait. URL: https://m-tronic-dt.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=1&Itemid=6&lang=ru (data zvernennia 08.07.2025)
3. EuSAMA TS-02-76, code (1976) ‘Recommendation for performance test specification of car vehicle suspension testing system, European Shock Absorber Manufacturers Association.
4. 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
5. Arbeláez, J.J., Marín, J.P. and Calle, T. (2007) ‘Modelado, diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la adhesión en la evaluación en suspensiones de vehículos livianos bajo la norma European Shock Absorber Manufacturers Association (EuSAMA), 8th Iberoamerican Congress of Mechanical Engineering, October, Vol. 1, No. 1, pp.141–150.
6. Stoßdämpferprüfstand LON-SA2D/FWT für PKW und Transporter bis 1,1 t Achslast verstärkte Version bis 2,0 t Achslast. Bedienungsleitung. 3. Ausgabe, MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG. 2003.
7. Tomasz L. Stańczyk1 , Rafał Jurecki. Analiza porównawcza metod badania amortyzatorów hydraulicznych. - *Zeszyty naukowe instytutu pojazdów* 4(100)/2014 pp 25-45.
8. Suspension tester and method. Patent USA 5369974A, pryor.1992-11-10, publ. 1994-12-06.
9. Opysanye tipa sredstva yzmerenyi. vebsait. URL: <https://media.belgim.by/grsi/11157.pdf> (data zvernennia 24.01.2025).
10. Calvo J.A., San Román J.L., Alvarez-Caldas C.: Procedure to verify the suspension system on periodical motor vehicle inspection. *International Journal of Vehicle Design*. 2013, 63(1), 1–17, DOI: 10.1504/IJVD.2013.055497

11. Gardulski J., Badania diagnostyczne amortyzatorów. - DIAGNOSTYKA2 (38)/2006, pp 187-198.
12. Losia Z. Application of modelling and simulation to evaluate the theta method used in diagnostics of automotive shock absorbers/ Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji • June 2022 DOI: 10.14669/AM/150823
13. Lozia, Z., Zdanowicz, P. (2018). Simulation assessment of the impact of inertia of the vibration plate of a diagnostic suspension tester on results of the EUSAMA test of shock absorbers mounted in a vehicle. KONMOT 2018 Conference. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 421. 022018 IOP Publishing DOI 10.1088/1757-899X/421/2/022018.
14. Dytiatiev 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. DOI 10.36910/automash.v2i21.1213
15. Zbigniew Lozia and Piotr Zdanowicz. Simulation assessment of the half-power bandwidth method in testing shock absorbers. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0011> Received Jul 13, 2020; accepted Sep 28, 2020.
16. ZDANOWICZ, P. Comparative assessment of vertical vibrations of a vehicle on the road and during the EUSAMA test. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 421(2) [accessed 2020-08-07]. ISSN 1757-899X. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/421/2/022045/pdf>
17. Dytiatiev O.V., Reva V.B. Pro pokhybku stendovoho kontroliu pidvisky. U naukovomu zhurnali «SUCHASNI TEKHNOLOHII V MASHYNOBUDUVANNI TA TRANSPORTI» №2 (19) LUTsK 2022 s.81...88. DOI 10.36910/automash.v2i19.906
18. Dytiatiev O.V. Vplyv netestovanoho kola osi na pokhybku vyznachennia dempfuvannia kola, shcho testuietsia metodom EuSAMA - «Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti». Naukovyi zhurnal. – Lutsk: LNTU, 2024.– №1(22).– S. 139 – 146. DOI 10.36910/automash.v1i22.1354.

O. Dityatyev. Assessment of the influence of nonlinear characteristics of suspension components, shock absorber, on the results of their diagnostic.

Shock absorbers in a car are a key element of the suspension, which provides comfort and safety when driving. They work in tandem with an elastic device, absorbing the energy of impacts and shocks that occur when driving over uneven roads. The shock absorber prevents body swaying, reduces vibration and provides a smoother movement of the body. In the process of operation, the parameters of the shock absorber decrease, safety and comfort, vehicle performance decrease, vehicle stability deteriorates, braking distance increases, body swaying progresses when driving, knocks and noises appear in the suspension, uneven tire wear. This necessitates periodic monitoring of the shock absorber condition using diagnostics. There is a widespread lack of disassembly diagnostics, fragments of installation and dismantling robots are very labor-intensive, requiring the need for special equipment and qualified specialists. In practice, bench diagnostics are used by activating the suspension with a periodic signal, in which, to a large extent, it is not the shock absorber that is tested, but the suspension. Therefore, when testing the assembled suspension, the shock absorber testing section contains information about other suspension components. This is a source of errors in shock absorber diagnostics. Suspension components can have both linear and nonlinear characteristics, and both of them, through the presence of errors and untimely replacement of the shock absorber, can limit its actual performance. In this paper, using the simulation modeling method, the influence of nonlinear characteristics, such as dry friction and play in the suspension, on the error in shock absorber diagnostics is considered.

Keywords: shock absorber, diagnostics, nonlinear characteristics, errors, 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: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1920

Захарчук О.В., Захарчук В.І., Хомич С.М., Приступа С.О.
Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ МАШИНОБУДІВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ РЕМОНТІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ

Економічна ефективність відновлення деталей полягає в тому, що собівартість відновлення зазвичай нижча за вартість нових деталей, так як при цьому невелика трудомісткість та тривалість процесу, а також невеликі затрати на матеріали. Одним із найкращих та прогресивних способів відновлення деталей є застосування гальванічних покриттів. Розглядаються проблеми та можливості, пов'язані з нанесенням гальванічних покриттів на автомобільних компонентах під час ремонту. Технологічні процеси гальванізації пов'язані з необхідністю наявності вартісного обладнання, великими витратами енергії, води і хімічних матеріалів, а також шкідливим впливом на навколишнє середовище. В умовах відсутності авторемонтних заводів цей спосіб відновлення можна віднести до машинобудівних технологій. Основні методи включають насталування, хромування та нікелювання. Вибір доцільного металу для гальванічного покриття залежить головним чином від врахування критеріїв вартості покриття, мікротвердості поверхні, тривалості нанесення та коефіцієнта відбиття, а також екологічного критерію. Прийняті технічні рішення щодо вибору відповідного гальванічного покриття були встановлені методом аналізу ієрархій. Вибираючи метал для гальванічного покриття, який відповідав би різним критеріям, було визначено доцільне покриття для деталей автомобіля. Нікель є найбільш пріоритетним вектором.

Ключові слова: ремонт автомобілів, відновлення деталей автомобілів, гальванічні покриття, метод аналізу ієрархій, критерії вибору доцільного покриття.

ВСТУП

Сучасні автомобілі представляють собою складні технічні системи довготривалого користування. Під час експлуатації автомобілів відбуваються незворотні погіршення робочих характеристик їх складових частин. За сучасних економічних умов авторемонтне виробництво набуває нового підходу. Багатономенклатурність деталей, що утворилася внаслідок значної різноманітності рухомого складу, при незначній кількості кожного найменування пред'являє особливі вимоги до вибору технологічних процесів відновлення та зміцнення деталей.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До відомих способів нарощування шару металу відносять наплавлення, газотермічне напилення, припікання порошкового матеріалу та електролітичне осаджування. До недоліків наплавлення відносять високий термічний вплив, що призводить до короблення деталей, нераціональність застосування для відновлення поверхонь з незначними зношеннями [1]. Покриття, отримані напиленням, мають значну пористість та недостатньо міцне зчеплення з основою [2]. Недоліком металізації та припікання порошкового матеріалу є нерівномірність властивостей за шириною нанесеного шару покриття [3].

Одним із найкращих та прогресивних способів відновлення деталей є застосування гальванічних покриттів. Із гальванічних покриттів найбільш широко застосовуються насталування, хромування, нікелювання, цинкування та практично будь-які метали в якості витратних матеріалів для нарощування. Тому, застосування заходів нарощування металевих поверхонь деталей шляхом гальванічної обробки є актуальним завданням для підтримання роботоздатності автомобілів.

Більшість деталей працюють в умовах, де експлуатаційні навантаження сприймаються в основному їх поверхневим шаром. Стійкість до зносу, ініціювання та розвиток внутрішніх тріщин, виникнення центрів корозії залежать від опору поверхневого шару руйнуванню. Тому в багатьох випадках доцільно відновлювати та покращувати експлуатаційні властивості не всієї деталі, а достатньо нанести покриття з необхідними властивостями на її робочі поверхні [4]. Використання покриттів пов'язане з впровадженням фундаментально нового підходу до відновлення та покращення експлуатаційних властивостей: міцність та вантажопідйомність деталі забезпечуються за рахунок матеріалу, з якого вона виготовлена, а стійкість до зносу, корозії та інших факторів зростає за рахунок застосування багатофункціональних покриттів [4].

Відновлення поверхневого шару деталі досягається за допомогою нанесення на поверхню деталі, яку слід відновити, матеріалів, які відрізняються за своїми властивостями від основного матеріалу деталі та відповідають умовам її експлуатації (зносу, корозія). Багатофункціональні покриття дозволяють збільшити термін служби деталей транспортних засобів під час відновлення

зношених частин і, водночас, зменшити витрати на сплави сталі та сплави [4]. Використання покриттів дозволить збільшити термін служби частин технічного обладнання шляхом підвищення стійкості до зносу, зміцнення поверхневого шару, відновлення зношених частин при заміні дорогих матеріалів на більш економічні [5].

За допомогою нарощування зношені поверхні валів відновлюються шляхом нанесення покриттів на їх робочі поверхні, які стійкі до абразивного, корозійного та інших видів зносу та руйнування. У той же час підвищення тепловиділення під час нанесення покриттів значної товщини за допомогою методів насипання викриває геометрію деталей, які слід відновити, скорочує їх термін служби, і насипання покриттів значної товщини вимагає видалення значних допусків під час заключної механічної обробки [5].

Методи нанесення не забезпечують збереження початкових властивостей матеріалу покриття; вони вносять значні зміни в структуру матеріалу відновлюваних частин. Це пов'язано з тим, що матеріал покриття нагрівається до температур, що перевищують його температуру плавлення, що призводить до зниження фізико-механічних властивостей покриттів і, в результаті, неможливо отримати високі експлуатаційні властивості деталей [6].

Отже, збільшення терміну служби технічного обладнання за рахунок зменшення інтенсивності зносу таких важливих та вартісних частин, як вали, за допомогою нанесення багатофункціональних покриттів, отриманих з використанням адитивних технологій, є однією з основних задач у сфері ремонту.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є вибір доцільного гальванічного покриття для відновлення деталей автомобілів шляхом застосування методу аналізу ієрархій.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні **завдання**:

- Аналіз проблем та перспектив нанесення на деталі автомобілів гальванічних покриттів з метою відновлення.
- Прийняття технічних рішень вибору доцільного гальванічного покриття на основі методу аналізу ієрархій.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На початковому етапі здійснюється вибір основних критеріїв, які впливають на вибір металу для гальванічного покриття. Гальванічний метод є поширеною технікою нанесення металевих покриттів в різних галузях промисловості, включаючи ремонт автомобілів. При виборі металу для гальванічного покриття звертається увага на такі фактори: вартість, мікротвердість, термін служби покриття, коефіцієнт відбиття гальванічного покриття, екологічні критерії. Кількість і геометричні параметри компонента визначають вартість покриття.

При збільшенні товщини, яка задається технічними вимогами, вартість збільшується непропорційно і визначається згідно формули:

$$C = K_z \cdot (C_1 - C_2), \quad (1)$$

де C – вартість нанесення покриття, грн.;

C_1 – вартість робіт по нанесенню покриття товщиною 1 мкм/дм²;

C_2 – вартість додатково затрачених матеріалів і робіт (очищення, шліфування, полірування та ін.), грн.;

K_z – коефіцієнт затрат на збільшення трудомісткості та машинного часу.

Зниження вартості нанесення покриття здешевлює собівартість виробництва.

Оцінка мікротвердості гальванічного покриття здійснюється шляхом визначення величини площини відбитка індикатора при заданому навантаженні за формулою Віккерса:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (2)$$

де HV – мікротвердість покриття, Н/мм²;

P – навантаження, Н;

d – діагональ відбитка, мм.

Збільшення мікротвердості гальванічних покриттів тягне за собою збільшення зносостійкості гальванічних покриттів, яка обумовлена конкретною технологією та може бути оцінена по закону Фарадея:

$$\tau = \frac{\rho \cdot \delta}{\epsilon \cdot j_c \cdot \eta \cdot 100}, \quad (3)$$

де τ – тривалість процесу гальванічної обробки, год;
 j_c – катодна густина струму, А/м²;
 δ – задана товщина покриття, м;
 ϵ – електрохімічний еквівалент металу, г/(Агод);
 ρ – густина металевого покриття, г/м³;
 η – вихід металу по струму.

Скорочення часу процесу електролізу призводить до підвищення продуктивності гальванічного процесу. Коефіцієнт відбиття гальванічного покриття визначається відношенням потоку випромінювання, відбитого металом, до випромінювання, що падає на поверхню:

$$K_{\text{відб}} = \frac{\Phi}{\Phi_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де $K_{\text{відб}}$ – коефіцієнт відбиття, %;
 Φ – потік відбитого випромінювання, Вт;
 Φ_0 – потік падаючого випромінювання, Вт.

Збільшення коефіцієнта відбиття металевих покриттів має опосередкований вплив на корозійну та жаростійкість, а отже, і на термін служби компонента.

Для оцінки екологічної небезпеки процесів при гальванічній обробці існує «екологічний критерій»:

$$EK = \sum_{m=1}^M \frac{C_m^{\max}}{ПДК_m}, \quad (5)$$

де EK – екологічний критерій;
 C_m^{\max} – максимальна концентрація m-ного токсичного компонента електроліту, мг/л;
 M – число токсичних компонентів, од.

Чим більше значення екологічного критерію, тим екологічно небезпечніші стічні води, в склад яких входить той чи інший компонент розчину електроліту.

На рисунку 1 показано ієрархічну структуру, яка складається з мети дослідження (вибору доцільного гальванічного покриття); критерії, які впливають на вибір; та різних видів металів.

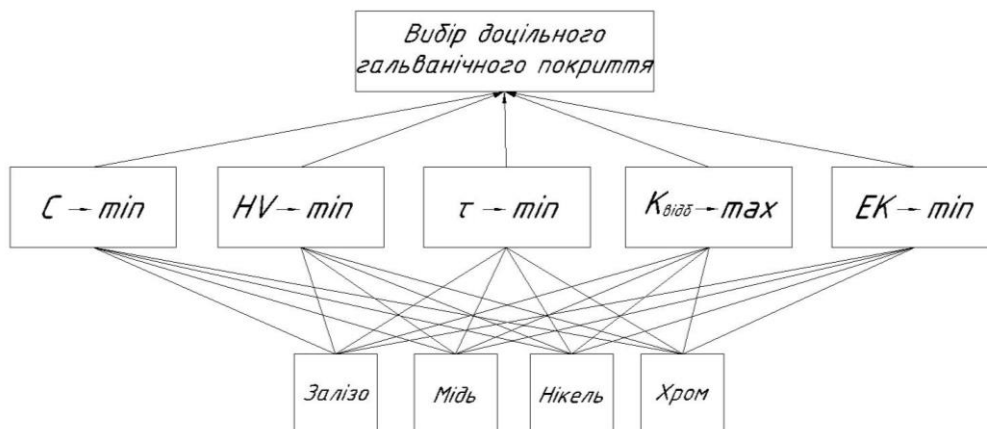


Рисунок 1 – Ієрархія мети, критеріїв та альтернатив при виборі гальванічного покриття

В таблиці 1 наведені розрахунки значень критеріїв (1)-(5) для альтернатив покриття.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

При нанесенні захисних покриттів та відновленні деталей транспортних засобів широке поширення отримав спосіб гальванічного осадження металів. Цей спосіб застосовується для компенсації зношених поверхонь деталей, а також при нанесенні захисних та антикорозійних покриттів [7-8]. Із гальванічних покриттів можуть застосовуватися практично будь-які метали. Дане дослідження присвячене вибору доцільного покриття при ремонті і відновленні деталей.

Таблиця 1 – Вихідні значення критеріїв для різних металів покриття

Критерій \ Метал	C, грн	HV, МПа	τ, год	K _{відб} , %	EK
Цинк	20	550	0,516	55	0,4

Мідь	26	700	0,265	73	20
Нікель	24	3500	0,214	66	5,2
Хром	60	9000	1,662	62	10,2
Сталь	35	560	1,05	70	8,5

ВИСНОВКИ

Проаналізовано проблеми та перспективи нанесення на деталі автомобілів гальванічних покриттів з метою відновлення. Основними способами є насталування, хромування, нікелювання та ін.

Було здійснено прийняття технічних рішень вибору доцільного гальванічного покриття на основі методу аналізу ієрархій. Вибрано основні критерії, які впливають на вибір металу для гальванічного покриття: вартість нанесення; мікротвердість; тривалість нанесення; коефіцієнт відбиваючої здатності; екологічний критерій. Шляхом багатокритеріального вибору металу для гальванічної обробки здійснено пошук найкращого покриття для деталей автомобіля. Максимальне значення вектору глобального пріоритету відповідає металу «Нікель».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ahieiev M., Gritsuk I., Litikova A., Bilousov I., Vrublevskiy R., Boboshko O., Smyrnov O., Saraieva I., Khudiakov I., Pohorletskiy D. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. *SAE Technical Paper Series*, 2021. DOI: 10.4271/2021-01-5100.
2. Ляшенко Б.А., Агеєв М.С., Волков В.П., Захарчук О.В., Устінцев С.М. Побудова методології оптимального використання багатоопераційних технологій відновлення та зміцнення поверхонь деталей суднових механізмів в процесі ремонту. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2021, №43, с. 191–202.
3. Лопата Л.А., Лопата В.М., Медведєва Н.А., Тунік Т.М. Дослідження відновлення автомобільних деталей типу «вал» електродуговою металізацією. *Конструирование и технология производства с/х машин*, Кіровоград: КНТУ, 2005, вип. 35, с. 409–416.
4. Агеєв М.С., Грицук І.В., Солових Е.К. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 2020, вип. 194, с. 81–92. DOI: 10.18664/1994-7852.194.2020.230412.
5. Mateichyk V., Ahieiev M., Mościszewski J., Ustincev S., Volodarets M., Kovbasenko S. The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. *Transportation Research Procedia*, 2023, vol. 74, p. 592–599. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.186.
6. Ляшенко Б.А., Солових Є.К., Лопата Л.А., Марчук В.С. Підвищення міцності та довговічності деталей машин агропромислового комплексу багатфункціональними покриттями. *Доп. сесії Наукової ради з проблеми «Механіка деформівного твердого тіла» НАН України*, Полтава, 15–16 жовтня 2008, с. 15–31.
7. Livesey W.A., Robinson A. *The Repair of Vehicle Bodies*. Engineering & Technology. 2010. 456 P. ISBN 0750667532. <https://doi.org/10.4324/9780203075470>.
8. Duffu J.E. *Auto Body Repair Technology*. 2011. ISBN 0750667532.

REFERENCES

1. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A., Bilousov, I., Vrublevskiy, R., Boboshko, O., Smyrnov, O., Saraieva, I., Khudiakov, I., & Pohorletskiy, D. (2021). Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in repair technologies. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2021-01-5100>.
2. Liashenko, B. A., Ahieiev, M. S., Volkov, V. P., Zakharchuk, O. V., & Ustintsev, S. M. (2021). Pobudova metodolohii optymalnoho vykorystannia bahatooperatsiinykh tekhnolohii vidnovlennia ta zmitsnennia poverkhon detailiei sudnovykh mekhanizmv v protsesi remontu [Development of a methodology for the optimal use of multi-operation technologies for restoration and strengthening of ship mechanisms surfaces during repair]. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu*, (43), 191–202.
3. Lopata, L. A., Lopata, V. M., Miedvedieva, N. A., & Tunik, T. M. (2005). Doslidzhennia vidnovlennia avtomobilnykh detalei typu "val" elektroduhovoioi metalizatsiieiu [Research on restoration of automobile shaft-type parts by electric arc metallization]. *Konstruirovaniie i tekhnologiiia proizvodstva s/kh mashin*, (35), 409–416.
4. Ahieiev, M. S., Hrytsuk, I. V., & Solovykh, E. K. (2020). Zastosuvannia kombinovanykh tekhnolohii vidnovlennia dlia pidvyshchennia resursu detalei zasobiv transportu [Application of combined restoration technologies to improve the service life of transport parts]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, (194), 81–92. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>.

5. Mateichyk, V., Ahieiev, M., Mościszewski, J., Ustincev, S., Volodarets, M., & Kovbasenko, S. (2023). The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. *Transportation Research Procedia*, 74, 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.186>.
6. Liashenko, B. A., Solovykh, Ye. K., Lopata, L. A., & Marchuk, V. Ye. (2008, October 15–16). Pidvyshchennia mitsnosti ta dovhovichnosti detalei mashyn ahropromyslovoho kompleksu bahatofunktionalnymy pokryttiamy [Improving the strength and durability of agricultural machinery parts with multifunctional coatings]. *Conference of the Scientific Council on the Problem “Mechanics of a Deformable Solid Body” of the NAS of Ukraine*, Poltava, 15–31.
7. Livesey, W. A., & Robinson, A. (2010). *The repair of vehicle bodies*. Engineering & Technology. <https://doi.org/10.4324/9780203075470>.
8. Duffu, J. E. (2011). *Auto body repair technology*. Cengage Learning. ISBN 0750667532.

V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, S. Khomych, S. Prystupa. The Use of Mechanical Engineering Technologies in the Repair and Restoration of Parts

The economic efficiency of parts restoration lies in the fact that the cost of restoration is usually lower than the cost of new parts, since the process requires relatively little labor and time, as well as low material expenses. One of the best and most advanced methods of restoring parts is the application of galvanic coatings. The problems and opportunities associated with the application of galvanic coatings to automotive components during repair and restoration are considered. Galvanization processes are associated with the need for expensive equipment, high consumption of energy, water, and chemical materials, as well as harmful effects on the environment. In the absence of automobile repair plants, this method of restoration can be attributed to mechanical engineering technologies. The main methods include hardening, chrome plating, nickel plating, and others. The choice of a suitable metal for galvanic coating mainly depends on such criteria as coating cost, surface microhardness, coating time, reflection coefficient, as well as environmental factors. The technical decisions regarding the choice of an appropriate galvanic coating were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP). This is a mathematical-logical decision-making method that helps to select the best option among several alternatives when multiple criteria are considered. By choosing a metal for galvanic coating that meets different criteria, the most appropriate coating for automotive parts was determined. Nickel proved to be the most prioritized option.

Keywords: automobile repair, automotive parts restoration, galvanic coatings, Analytic Hierarchy Process, coating selection criteria.

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>

ХОМИЧ Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса, Луцький національний технічний університет, e-mail: smhh@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0926-8703>

ПРИСТУПА Станіслав Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, e-mail: s.prystupa@lntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3705-1541>

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>.

Serhii KHOMYCH, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Head of the Department of Agricultural Engineering named after Professor H.A. Khailis, Lutsk National Technical University, e-mail: smhh@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0926-8703>

Stanislav PRYSTUPA, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of the Department of Electronics and Telecommunications, Lutsk National Technical University, e-mail: s.prystupa@lntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-3705-1541>

Дата надходження статті до видання: 10.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1922

Іванкова О. В., Федін В. О.

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

У наш час існує потреба в удосконаленні системи технічного обслуговування агропромислових підприємств. Збільшення ресурсу машин є пріоритетним завданням галузі технічного обслуговування. Розробка прогресивних технологій ремонту техніки є першочерговим завданням для нашої країни.

Досягнення високого рівня надійності та довговічності обладнання можливе тільки через комплексне вирішення завдань галузі технічного обслуговування. Потрібні сучасні високопродуктивні та ресурсозберігаючі технології відновлення ресурсу обладнання, ремонту машин та відновлення зношених деталей.

Використання методів пластичної деформації в процесах виготовлення та ремонту деталей машин дозволяє отримувати високоякісне та ефективне формування. Процеси пластичної деформації при відновленні зношених деталей мають обмежене застосування. Існує потреба в дослідженнях застосування пластичної деформації у відновленні конкретних деталей.

Шестеренні насоси є важливою частиною гідравлічних систем машин. Основні несправності агрегатів гідравлічної системи: падіння в об'ємній ефективності, погіршення керування та порушення регулювань агрегату. Необхідно розробити оптимальну технологію відновлення втулок.

У статті представлено аналіз умов експлуатації шестеренних насосів та характерних дефектів і зносу втулок. Це показує, що зношені втулки можна відновити. Були розроблені робочі інструменти для виконання процесу відновлення зношених втулок.

Обґрунтували режими відновлення втулок та запропонували режим термічної обробки: штучне витримання протягом 6 годин за температури 180°C. Зроблено висновок про можливість використання пластичної деформації для відновлення втулок.

Ключові слова: насос, ресурс, спряження, втулка, відновлення, довговічність, зношування, об'єм, пластичне деформування, роздача, осаджування.

ВСТУП

Велика кількість деталей сільськогосподарської техніки, зокрема, агрегатів гідравлічних систем двигунів внутрішнього згорання, працює в умовах доволі жорстких циклічних навантажень та інтенсивного тертя. Тому, розробка технологічних процесів відновлення розмірів та зміцнення поверхонь саме таких деталей видається одним із важливих шляхів у досягненні високого рівня довговічності деталей [1,2].

Метод пластичного деформування для відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки формує зносостійку поверхневу структуру, практично виключає утворення зони термічного впливу. До того ж має високі економічні та екологічні параметри технологічного процесу.

При розробці процесів пластичного деформування: роздачі або осаджування деталей типу втулок нас цікавить характер деформації при цьому. Важливими є дані про напружено-деформований стан матеріалу деталей (заготовок) та вплив на нього різних параметрів режиму технологічного процесу [8].

Технологічний процес осадження втулок полягає у компенсації зношеного шару матеріалу зменшенням висоти втулки. Тому, при осаджуванні деталей типу втулок особливо важливим є виявлення характеру залежності зміни об'єму втулки від зміни параметрів обробки.

Для дослідження характеру деформації, характеру залежності зміни його від зміни параметрів обробки деталей при здійсненні процесів пластичного деформування можуть використовуватися різноманітні методи: аналітичні, експериментальні, імітаційного моделювання. З точки зору ефективності та точності найкраще зарекомендували себе комбіновані експериментально-розрахункові методи [2,14]. Все вище сказане обумовлює актуальність проведення дослідження характеру залежності зміни об'єму втулки від зміни параметрів обробки при осаджуванні деталей.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вирішенню завдань підвищення надійності деталей машин присвячена велика кількість робіт видатних вчених. Над дослідженнями відновлення надійності деталей машин працює багато науковців, а також інженерів-практиків. Дослідження базуються на аналізі теоретико-розрахункових досліджень та випробованні результатів на практиці.

Літературні джерела містять дані, які ґрунтуються на результатах теоретичних, експериментальних досліджень і на досвіді експлуатації деталей машин.

У літературних джерелах є велика кількість результатів проведених досліджень по використанню методів пластичного деформування у машинобудуванні. Переважно висвітлюється використання технологій обробки із застосуванням пластичного деформування окремих видів деталей при їх виготовленні. Застосування ж пластичної деформації у галузі технічного сервісу при відновленні деталей машин висвітлено, на нашу думку, недостатньо.

Пластичне деформування можна здійснювати через різноманітні схеми навантаження деталей.

Питання дослідження міцності, пластичності, пошкоджуваності матеріалу під час деформування, оцінки напружено-деформованого стану розглядаються у великій кількості наукових робіт

Над вивченням трибофізичних основ підвищення надійності мобільної сільськогосподарської, автотранспортної техніки та розробкою технологій відновлення працює професор Аулін В.В. [11].

Дослідженнями немонотонної пластичної деформації в процесах обробки металів тиском з метою отримання оцінки напружено-деформованого стану деталей займаються Р. І. Сивак, В. А. Огородніков, Т. Ф. Архіпова [1,12,14,15].

Науковці Матвийчук В. А., Михалевич В. М. у своїх працях досліджували механізм розвитку процесів локального деформування заготовок. Також розробили критерії оцінювання деформованості матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням металевих зразків [1,2,11].

Визначенням залишкових напружень у пластично деформованих деталях займаються Вахрушева В. С., Малиш О. Д., Грузін Н. В. та інші науковці [13].

Дослідження по зміцненню поверхневим пластичним деформуванням циліндричних довгомірних деталей, зокрема стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів проводять Афтаназів І., Шевчук Л., Строган О. [2].

Питаннями підвищення ресурсу зношених деталей типу втулок шляхом вібраційного деформування успішно займаються науковці школи професора Дуднікова А.А. [9,10].

Одним із найменш вивчених питань у теорії та практики використання пластичного деформування залишається вивчення характеру деформації при відновленні.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної роботи є вивчення характеру деформації при відновленні пластичним деформуванням втулок шестеренних шестеренних насосів. Для цього необхідно:

- дослідити умови експлуатації насосів, характерних дефектів і зносів втулок насосів;
- провести аналіз методів відновлення зношених втулок;
- розробити робочі інструменти для деформування втулок;
- розглянути зміцнення при деформуванні втулок;
- обґрунтувати режими відновлення втулок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Шестеренні насоси є частиною гідравлічних систем машин. Призначення шестеренчастого насосу - нагнітання та перекачування робочих рідин, переважно мінеральних масел. Вони встановлюються у механізмах рульового керування, приводів керування причіпними та навісними знаряддями тракторів, дорожніх та інших машин [3].

Принцип дії: в корпусі насосу ведуча та ведена шестерні, які мають однакові довжини, знаходяться в зачепленні з мінімальним зазором. Бокові стінки корпусу прилягають до торцевих поверхонь цих шестерень. При роботі насоса, рідина, що перекачується, заповнює впадини між зубцями шестерень, переміщується з порожнини всмоктування по внутрішній поверхні корпусу у порожнину нагнітання.

Основними несправностями агрегатів гідросистем є: падіння об'ємного коефіцієнта корисної дії нижче за норму, зазначену в технічних умовах, погіршення управління, наявність граничних зносів деталей, порушення регулювань агрегатів. Основні види зношування деталей гідроагрегатів — абразивний та гідроабразивний. Зношування деталей та старіння гумових ущільнень агрегатів і вузлів веде до виникнення зовнішніх і внутрішніх протікань робочої рідини, через що падає об'ємний коефіцієнт корисної дії [4,7].

Несправності агрегатів гідросистеми виявляють переважно діагностуванням, так як розбирання негативно впливає на герметичність з'єднань, і знижує довговічність агрегатів. Технічний стан

насосів перед ремонтом визначають випробуванням на стендах. Якщо під час випробування коефіцієнт подачі насоса менше 0,65, то насос ремонтують [5, 6].

Шестеренні масляні насоси типу мають зношування стінок колодязів корпусу зі сторони камери всмоктування в з'єднаннях із шестернями, втулками, опорною поверхнею під втулками і поверхнями під ущільнювальною манжетою. Крім того, можуть бути тріщини і раковини на поверхні деталей, а також зрив або зноси різьби під болти кріплення кришок та приєднувальних муфт до корпусу. Основні зноси втулок: знос поверхні торця, яка працює в спряженні з шестернею, знос внутрішньої циліндричної поверхні, знос малої циліндричної поверхні хвостовика втулки, зноси великої циліндричної поверхні і малої торцевої поверхні в спряженні з ущільнювальною манжетою та корпусом.

Нами було проведено дослідження (зокрема, мікрометраж) 10 пар втулок по зносу зовнішньої та торцевої поверхонь. В результаті цього виявили найбільше значення зносу спряження торцевих поверхонь втулки та шестерні. На рисунку 1 приведена діаграма результатів мікрометражу 20 шт. втулок насосів по зовнішньому діаметру. А рисунок 3 - діаграма зносу поверхні торця зношених втулок.

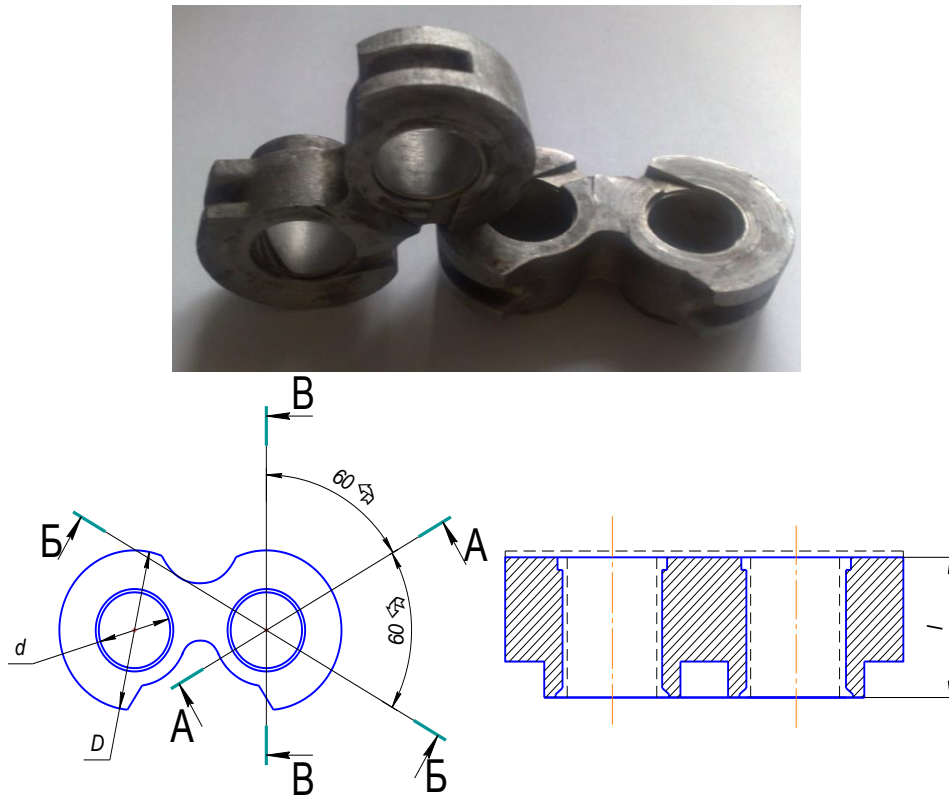


Рисунок 1-Зовнішній вигляд зношених втулок та схема мікрометражу

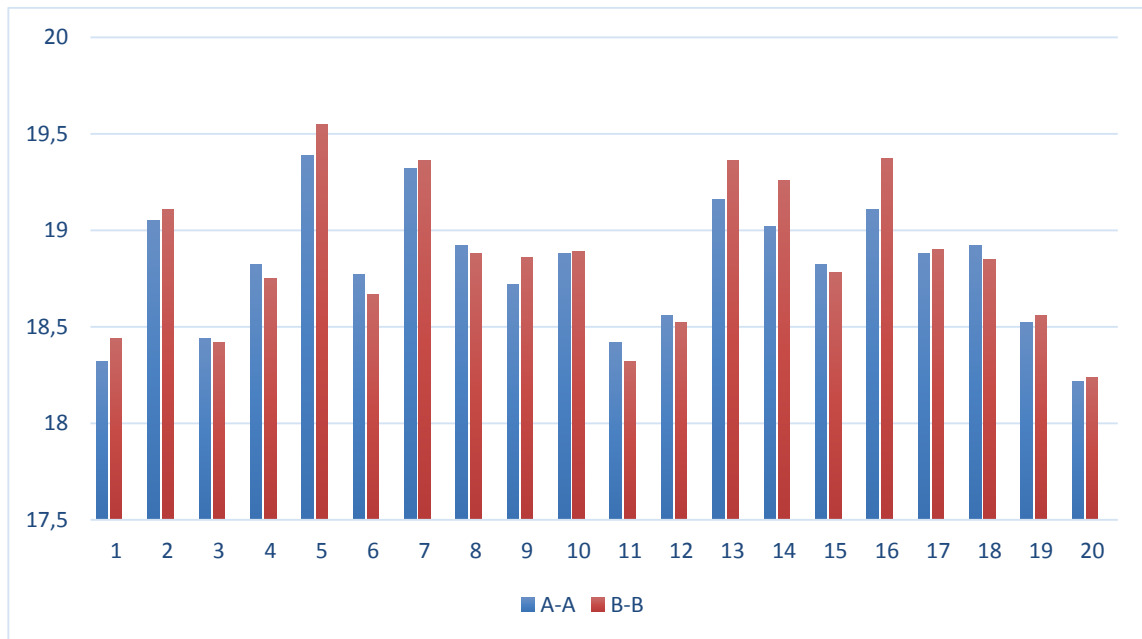


Рисунок 2 – Результати мікрометражу зношених втулок насоса по зовнішньому діаметру

Втулки шестеренного насоса сприймають як абразивне, так і теплове зношування. Тепловий знос є наслідком відносних переміщень спряжених поверхонь з великими швидкостями. Пара тертя при цьому сприймає дію значного питомого навантаження.

При досягненні температури тертя 300°C і вище починається суттєве зниження міцності робочих поверхонь втулок. Тоді теплове зношування характеризується контактним захопленням і пластичним руйнуванням поверхні з налипанням і розмиванням металу на поверхнях тертя.

У разі інтенсивного розвитку зносу з утворенням задириків і натирань алюмінію та налипання м'яких часточок алюмінію на сталеві шестірні, зростає коефіцієнт тертя. А це може стати причиною заклинювання і виходу з ладу спряжених деталей

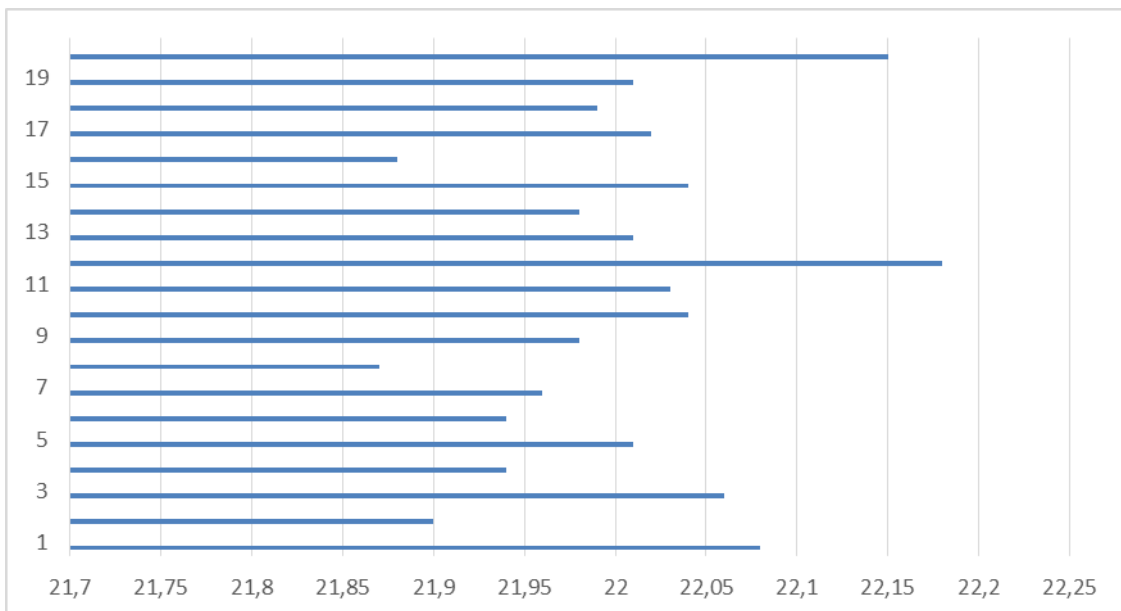


Рисунок 3 – Діаграма зносу поверхні торця зношених втулок

В результаті наших досліджень дійшли до висновку, що середній знос внутрішнього діаметру втулки складає 0,14...0,21 мм, знос зовнішнього діаметра втулки становить 0,08...0,16 мм. Спостерігається конусність зовнішнього діаметра втулок в межах - 0,02...0,03мм.

Найбільш інтенсивно зношування відбувається у спряженні «торець шестерні - торець втулки», але за умови наявності автокомпенсації торцевих зазорів він не чинить істотного впливу на зниження коефіцієнта подачі насоса.

Якість відновлення втулок мають безпосередній вплив на роботоздатність і довговічність шестерінчастого насоса після ремонту.

Є декілька способів відновлення втулок шестерінчастого насоса: 1- переплавленням, 2 – нарощуванням, 3 - пластичним деформуванням [8,9].

Спосіб відновлення переплавленням втулок з вибракуваних зараз широко використовується, але має недоліки: суттєві витрати енергії та на механічну обробку переплавленої втулки. Під час переплавлення вигорають легуючі елементи алюмінієвого сплаву, в результаті порушується хімічний склад, тому цей спосіб не можемо вважати прогресивним.

Нарощування зношених втулок можна виконати: гальванічними покриттями, покриттям полімерами, мідненням, термодифузійною металізацією, а також методом додаткових ремонтних деталей.

Відновлення деталей методом пластичного деформування ґрунтується на їх здатності змінювати форму і розміри за рахунок перерозподілу металу деталі. Цими методами деталі відновлюють як в холодному, так і в гарячому стані [8,15].

Суть способу осаджування заключається в компенсації зношеного шару матеріалу зменшенням висоти втулки. Висоту втулки можливо відновити або постановкою алюмінієвої шайби, або зменшити висоту колодязів корпусу.

Осаджування втулок проводиться на гідравлічному пресі П474Б при тиску $P=430...450$ МПа і з витримкою втулки під тиском протягом $t=2...3$ с. Перед осадженням втулки нагрівають до температури $T=450...500^{\circ}\text{C}$, так як алюмінієвий сплав АМО-7-3 (ISO 209-1) при холодній деформації має схильність до розтріскування.

Переваги: порівняна простота виконання і незначні затрати допоміжного металу. Недоліки: потреба у додатковій алюмінієвій шайбі, а також погіршення механічних властивостей поверхонь, що були відновлені.

В процесі осаджування всередині втулки повинен бути циліндричної форми пуансон для обмеження перетікання металу у внутрішню порожнину.

Після осадження внутрішній діаметр втулки повинен бути оброблений спеціальним дорном до потрібного ремонтного розміру. Після цього втулка встановлюється на спеціальну оправку токарно-гвинторізного верстата 1К62, де проточується зовнішня поверхня на до необхідного розміру

Форма і розміри втулок і пластичні властивості металів, із яких вони виготовлені, дозволяють використовувати окремі не робочі поверхні чи спеціально передбачені для запасу металу при відновленні їх методом пластичного деформування. Об'єм металу деталі залишається постійним.

Вивчення характеру деформації при відновленні

Навантаження, які діють на об'єкти, являють собою сили або пари сил (моменти), які можуть розглядатися як зосереджені або розподілені.

Так як у природі зосереджених сил не буває, усі реальні сили - це сили, розподілені за деякою площею або об'ємом. Зосереджені, та розподілені навантаження можуть бути як статичними, так і динамічними.

Закони зміни навантажень у часі може мати дуже складний характер. [12,14].

При обробці металів тиском відбувається значна зміна розмірів деталі, що пояснюється виникненням деформацій. При цьому повна деформація визначається як сума малих деформацій за весь процес деформації.

При відновленні пустотілого зразка деформаційний стан характеризується трьома головними деформаціями: двома деформаціями стиснення в радіальному напрямку і деформацією розтягування в осьовому напрямку. Характерним для даного процесу деформування є рівність деформацій які виникають в радіальному напрямку [12,13].

При розрахунку сумарної деформації по перетину використовується закон постійності об'єму [7,13,14]:

$$V = d_0 \cdot D_0 \cdot l_0 = d_1 \cdot D_1 \cdot l_1, \quad (1)$$

де d_0, D_0, l_0 - відповідно внутрішній, зовнішній діаметр і довжина зразка до деформації;

d_1, D_1, l_1 - відповідно внутрішній, зовнішній діаметр і довжина зразка після деформації.

В ході розробки процесу формозміни зразка визначаються загальний (сумарна) ступінь деформації. При цьому точне рішення можна отримати при використанні інтегральних показників ступеня деформації. Основна перевага цих показників ступеня в тому, що вони пропорційні формозміни окремих обсягів зразка і можуть додаватися, що дозволяє підрахувати загальну ступінь деформації. Логарифмуючи в натуральних логарифми рівняння (1) одержимо:

$$\ln \frac{d_1}{d_0} + \ln \frac{D_1}{D_0} + \ln \frac{l_1}{l_0} = 0, \quad (2)$$

де

$$\ln \frac{d_1}{d_0} = \int_{d_0}^{d_1} \frac{dd}{d} = \varepsilon_1.$$

$$\ln \frac{D_1}{D_0} = \int_{D_0}^{D_1} \frac{dD}{D} = \varepsilon_2.$$

$$\ln \frac{l_1}{l_0} = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \varepsilon_3.$$

$$\text{Отже } \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0.$$

З рівняння (2) випливає, що інтегральний показник ступеня деформації описує процес формозміни технологічної операції стиснення.

Загальну (сумарну) ступінь деформації по поздовжньому перетину зразка знаходимо з рівняння:

$$\varepsilon_{i\acute{a}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_i, \quad (3)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_i$ - інтегральні ступені деформації окремих переходів.

Максимальний ступінь деформації, для коротких і середніх по довжині втулок (довжина яких не перевищує 1,5 - 2 діаметрів), можна визначити з умови, що осьові стискаючі напруги в не деформованій частині зразка не повинні перевищувати межі пропорційності металу, тобто повинна справджуватися рівність:

$$\sigma_z = \frac{P}{F} \leq \sigma_{d\sigma}, \quad (4)$$

де σ_z - значення осьової напруги;

$\sigma_{d\sigma}$ - межа пропорційності оброблюваного зразка.

При порушенні цієї рівності і зростанні осьової напруги до значення, рівного межі текучості, почнеться обтиснення зразка.

При обробці втулок, довжина яких перевищує 1,5 - 2 зовнішнього діаметра, необхідно враховувати стійкість заготовки. Для цього використовується формула Ейлера, що визначає значення критичної сили для порожнього стержня, який піддається осьовому здавлюванню [16]:

$$P_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \acute{O}}{(k \cdot l)^2}, \quad (5)$$

де P_k - значення критичної сили, при якій прямолінійна форма рівноваги стержня перестав бути стійкою;

E - модуль пружності;

\acute{O} - момент інерції поперечного перетину стержня;

k - коефіцієнт довжини, що залежить від характеру закріплення кінців стержня;

l - розрахункова довжина стержня (оброблюваної втулки).

У цьому випадку максимальний ступінь деформації визначимо з умови, що зусилля деформації не повинно перевищувати критичної сили P_k .

Перед початком виконання операції пластичної деформації втулки нагрівають в муфельній електропечі МП-8 до температури 380°C, щоб збільшити пластичні властивості металу з якого вони виготовлені (сплав АМО-3-7 системи Al-Cu-Sn).

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Встановлено, що для цього сплаву мінімальна твердість і відповідна їй максимальна пластичність, при яких потрібно робити пластичну деформацію, перебувають в інтервалі температури 450-500 °С.

Пластичне деформування.

Після нагрівання втулок масляних насосів проводиться їх осаджування на пресі. Для цього нагріту втулку поміщають в попередньо підігріту до температури 100-120 °С матрицю. Потім в торці втулки з боку торця шестерні, зібраними в касету пуансонами, видаляють колодязі у вигляді радіатора (рис. 4).

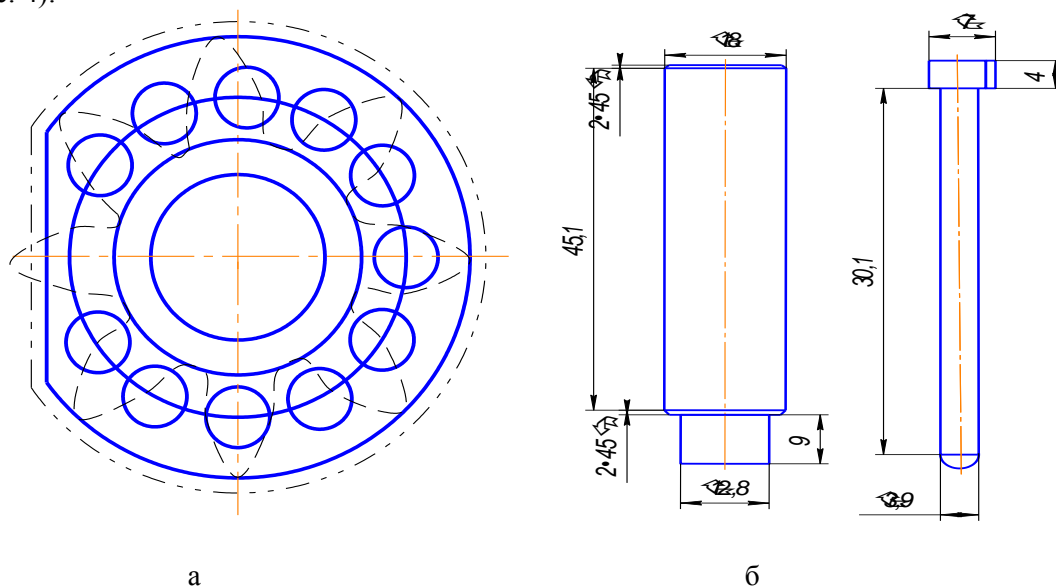


Рисунок 4 – Схема деформування втулки: а - зібрані в касету пуансони, б - пуансон;

Після процесу пластичного деформування проводиться штучне старіння [17] протягом 6 годин при температурі 180°C, чим досягається максимальна твердість матеріалу. Вплив температури старіння на твердість відновлених втулок показано на рис. 5.

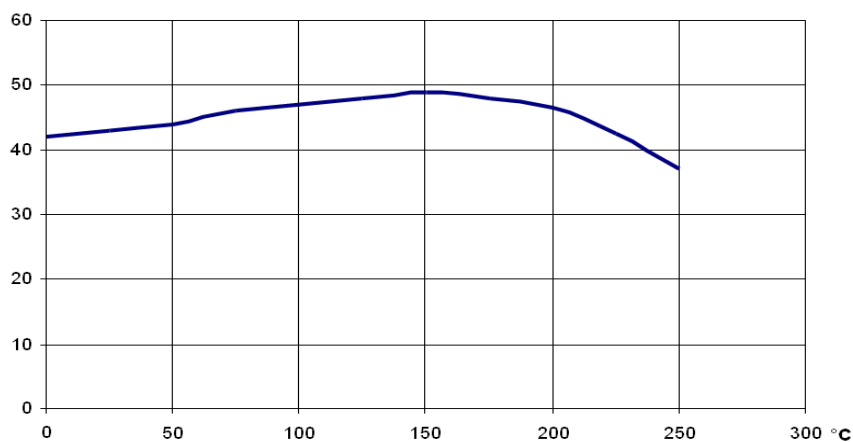


Рисунок 5 – Вплив температури старіння на твердість відновлених втулок

Аналізуючи графік можемо зробити висновок про оптимальні температури витримки (старіння) відновлених втулок: оптимальними є температури від 100 до 200°C.

ВИСНОВКИ

Отже, статтю ми присвятили аналізу характеру деформації при відновленні пластичним деформуванням втулок шестеренних насосів, в результаті:

1). провели аналіз умов роботи масляних насосів, характерних дефектів і зносів втулок масляних насосів показує, що зношені втулки можуть бути відновлені. Максимальний знос склав 148 мкм.

2). визначили, що найбільш перспективним методом відновлення зношених втулок є пластичне деформування.

3). розробили робочі інструменти для деформування втулок.

4). розглянули вплив зміцнення на фізико-механічні властивості металів: проведеними дослідженнями встановлено що твердість деформованого шару відновленої втулки складає НВ 450 - 550 МПа.

5). обґрунтували режими відновлення втулок: на основі результатів запропонували режим термічної обробки - штучне старіння протягом 6 годин при температурі 180°C, чим досягається максимальна твердість матеріалу.

6). зробили висновок про те, що спосіб пластичної деформації для відновлення втулок масляних насосів на ремонтних підприємствах можна використовувати для підвищення післяремонтного ресурсу насосів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Матвийчук В.А., Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування : монографія: Теорія і практика обробки матеріалів тиском. Запоріжжя, вид. АТ «Мотор Січ», 2016. С. 339– 363

2. Афтаназів І.С., Гавриш А.П., Киричок П.О. та ін. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: Навчальний посібник. Житомир: ЖІТІ, 2001. 516 с.

3. Шестерний насос – призначення і особливості. <https://kammash.com/ua/shesternij-nasos-priznachennya-i-osoblivosti/> (дата звернення: 07.05. 2025).

4. Технологічні особливості ремонту гідросистем тракторів. Щомісячний журнал AGROEXPERT <https://agroexpert.ua/tekhnohichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv/> (дата звернення: 10.05. 2025).

5. Устюянов П.Д., Домуці Д. П. Діагностування гідравлічної системи тракторів. Аграрний вісник причорномор'я. 2016. Вип. 80. С.76-81

6. Павлюк-Мороз, В. А. Стенд для перевірки ресурсу шестеренних насосів / В. А. Павлюк-Мороз, Р. А. Осін, В. Я. Чабанний // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2008. Вип. 38. С. 97-99

7. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій [монографія] / Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 168 с.

8. Хітров І.О., Кононогов Ю.А. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 35 (74) № 1 2024. С. 191-196.*

9. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. / Іванкова О.В. та ін. Вісник ПДАА. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk 2020.04.36

10. Dudnikov A.A., Ivankova O.V., Gorbenko O.V., Kelemesh A.O. Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. Eastern-European journal of enterprise technologies № 2/1 (110), 2021, P. 104-108. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606.

11. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія /Аулін В. В. [та ін.] ; за ред. проф. Ауліна В. В. Кропивницький : Лисенко В. Ф. [вид.], 2016. 303 с.

12. Сивак Р. І., Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Немонотонна пластична деформація в процесах обробки металів тиском: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2022. 202 с.

13. Вахрушева В. С., Малиш О. Д., Грузін Н. В. Визначення залишкових напружень у трубах. *Металознавство та термічна обробка металів № 1 (100), 2023. С. 8-13. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.280323.8.939*

14. Михалевич В. М. Математичні моделі граничних деформацій в залежності від виду напруженого стану / В. М. Михалевич // *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти : матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ ; Херсон, 2018. С. 98–101.
15. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/7 (90). P. 34-41.
16. Мельнікова О.Г. Підсумовуюча формула Ейлера та її застосування.//Фізико-математична освіта: Науковий журнал. 2017.Випуск 4 (14). С.225-228.
17. Технічні характеристики алюмінієвих сплавів. <https://alupro.ua/faq-ua/tehnycheskye-harakterystyky-alyumynnyevykh-splavov-kak-vybrat-nayluchshyj-splav-dlya-konkretnogo-proekta> (дата звернення: 09.05. 2025)

REFERENCES

1. Matviychuk V.A., Mykhalevych V.M. (2016). Development of local deformation processes: monograph: Theory and practice of pressure processing of materials. Zaporizhzhia, published by JSC "Motor Sich". 339–363.
2. Aftanaziv I.S., Gavrish A.P., Kyrychok P.O. and others. (2001). Increasing the reliability of machine parts by surface plastic deformation: Textbook. Zhytomyr: ZHITI. Gear pump - purpose and features. 516 p.
3. Gear pump – purpose and features. <https://kammash.com/ua/shesternij-nasos-priznachennya-i-osoblivosti/> (access date: 07.05.2025).
4. Technological features of tractor hydraulic system repair. Monthly magazine AGROEXPERT <https://agroexpert.ua/tekhnologichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv/> (access date: 10.05. 2025).
5. Ustyanov P.D., Domuschi D. P. (2016). Diagnostics of the hydraulic system of tractors. Agrarian Bulletin of the Black Sea Region. Issue 80. 76-81.
6. Pavlyuk-Moroz, V. A. (2008). Stand for checking the resource of gear pumps / V. A. Pavlyuk-Moroz, R. A. Osin, V. Ya. Chabannyi // *Design, production and operation of agricultural machines: all-state interdepartmental scientific and technical collection*. Kirovograd: KNTU. Issue 38. 97-99.
7. Tymchyk G.S., Filippova M.V., Demchenko M.O. (2023) Diagnostics of the stress-strain state of metal structures [monograph] / G.S. Tymchyk, M.V. Filippova, M.O. Demchenko // Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing House "Polytechnics". 168.
8. Khitrov I.O., Kononogov Yu.A. (2024) Restoration of parts by plastic deformation and methods for its implementation. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences Vol. 35 (74) No. 1*. 191-196.
9. Research on methods for restoring worn parts of agricultural machinery. / Ivankova O.V. et al. (2020). *Bulletin of the Ukrainian Agricultural Academy*. No. 4. 283–292.
10. Dudnikov A.A., Ivankova O.V., Gorbenko O.V., Kelemesh A.O. (2021) Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. *Eastern-European journal of enterprise technologies № 2/1 (110)*. 104-108.
11. Aulin V. V. (2016). Tribophysical foundations of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicle equipment using tribotechnical restoration technologies: monograph / edited by Prof. Aulin V. V. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. 303 p.
12. Sivak R. I., Ogorodnikov V. A., Arkhipova T. F. (2022). Nonmonotonic plastic deformation in metal pressure processing processes. Vinnytsia: VNAU. 202 p.
13. Vakhrusheva V. S., Malyshev O. D., Gruzin N. V. (2023) Determination of residual stresses in pipes. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals No. 1 (100)*. 8-13.
14. Mykhalevych V. M. (2018) Mathematical models of limit deformations depending on the type of stress state / V. M. Mykhalevych // *Theoretical and practical problems in pressure processing of materials and the quality of professional education: proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference*. Kyiv; Kherson. 98–101.
15. Sivak R. (2017). Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/7 (90). 34-41.
16. Melnikova O. G. (2017) Summary of Eulers Formula end Its Application // *Physics and Mathematics Education: Scientific Journal*. Issue 4 (14). 225-228.

17. Technical characteristics of aluminum alloys. <https://alupro.ua/faq-ua/tehnycheskye-harakterystyky-alyumynvevyh-splavov-kak-vybrat-nayluchshyj-splav-dlya-konkretnogo-proekta> (access date: 09.05. 2025)

O. Ivankova., V. Fedin. Research of parameters of the technology of restoration of parts by plastic deformation

Nowadays, there is a need to improve the technical maintenance system of agro-industrial enterprises. Increasing the service life of machines is a priority task of the technical maintenance industry. Developing progressive technologies for repairing machinery is a priority task for our country.

Achieving a high level of reliability and durability of equipment is possible only through a comprehensive solution to the tasks of the technical maintenance industry. Modern high-performance and resource-saving technologies for restoring equipment life, repairing machines and restoring worn parts are needed.

The use of plastic deformation methods in the processes of manufacturing and repairing machine parts allows for high-quality and effective shaping. Plastic deformation processes in the restoration of worn parts have limited application. There is a need for research into the application of plastic deformation in the restoration of specific parts.

Gear pumps are an important part of hydraulic systems of machines. The main malfunctions of hydraulic system units are: a drop in volumetric efficiency, deterioration of control, and violations of unit adjustments. Wear of pump bushings leads to a drop in volumetric efficiency, deterioration of control, and violations of unit adjustments. Wear of pump bushings leads to a drop in volumetric efficiency, deterioration of control, and disruption of unit regulation. It is necessary to develop an optimal technology for bushing restoration.

The paper presents an analysis of the operating conditions of oil pumps and the characteristic defects and wear of bushings. It shows that worn bushings can be restored. Working tools have been developed to carry out the process of settling worn bushings.

To carry out the process of sedimentation of worn bushings, working tools were developed. We substantiated the modes of restoration of bushings and proposed a heat treatment mode. Artificial aging for 6 hours at a temperature of 180°C. It was concluded that plastic deformation could be used to restore bushings.

Keywords: pump, resource, bushing, recovery, durability, wear, volume, plastic deformation, distribution, sedimentation.

ІВАНКОВА Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту Полтавського державного аграрного університету (вул. Г. Сковороди 1/3, Полтава, 36003, Україна, e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua)

ФЕДІН Віталій Олексійович – здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії спеціальності 133 Галузеве машинобудування. ОНП Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва Полтавського державного аграрного університету (вул. Г. Сковороди 1/3, Полтава, 36003, Україна)

Olena IVANKOVA - Ph.D, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering and Road Transport Poltava State Agrarian University. 1/3 G. Skovorody St., Poltava, 36003, Ukraine

Vitaliy FEDIN – postgraduate, specialty 133 Industrial mechanical engineering educational and scientific program Machinery and means of mechanization of agricultural production. Poltava State Agrarian University. 1/3 G. Skovorody St., Poltava, 36003, Ukraine

Дата надходження статті до видання: 14.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1923

Ковцур К.Г., Федоров В.Ю.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

РОЗРОБКА ПЛАНУ ЕКСПЕРЕМЕНТУ ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ В ПУНКТАХ ПЕРЕРОБКИ

Представлено план проведення моделювання процесу надходження вантажних автомобілів до пункту обслуговування з симуляцією динаміки формування черги з урахуванням відносного пріоритету в послідовності обслуговування автомобілів. З метою реалізації визначеної мети в рамках дослідження здійснено ґрунтовний аналіз та ідентифікацію законів розподілу ймовірностей стохастичних величин, зокрема моментів прибуття вантажних транспортних засобів та тривалості процедур обслуговування автомобілів. Отримані емпіричні й теоретичні результати слугуватимуть підґрунтям для подальшої математичної формалізації метрик, які характеризують тривалість перебування вантажних автомобілів у системах обслуговування.

Ключові слова: вантажний автомобіль, моделювання, вантажні перевезення, пункт переробки, черга, відносний пріоритет, час очікування.

ВСТУП

Визначення тривалості перебування вантажного транспорту в пунктах обслуговування дає змогу підвищити ефективність роботи й точніше оцінювати проекти розвитку системи доставки. У контексті сучасних викликів, таких як зростання обсягів вантажоперевезень, оптимізація ланцюгів постачань та забезпечення стійкості транспортної інфраструктури, надійні прогностичні моделі щодо цього параметра набувають особливого значення. Вони слугують не лише базовими вихідними даними для оптимізації процесів планування, проектування та оцінювання логістичних систем доставки вантажів, але й сприяють інтеграції передових технологій, таких як симуляційне моделювання та штучний інтелект, для підвищення загальної ефективності. Отже, завдання забезпечення високої точності та достовірності таких прогнозів набуває критичного значення в ширшому контексті загальної оцінки ефективності функціонування пунктів обслуговування, включаючи аналіз операційних витрат, зменшення простоїв та підвищення рівня сервісу для вантажоперевезень, що в підсумку сприяє економічному зростанню та екологічній стійкості транспортного сектору.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Слід зазначити, що задача прогнозування та моделювання роботи пунктів переробки з обслуговування вантажних автомобілів не є новою в науковому дискурсі, однак характеризується суттєвою складністю з позиції її математичної та алгоритмічної формалізації, що зумовлено багатопараметричністю стохастичних процесів і необхідністю врахування пріоритетних механізмів у системах черг.

В більшості наукових робіт представлені дослідження, де процес очікування обслуговування автомобілей визначається методом натурних обстежень [1]. У загальному випадку, при надходженні заявки з заданим пріоритетом, автомобіль розміщується в хвості черги. Перехід до обслуговування вимагає виконання таких умов: завершення поточного сервісного циклу для автомобілей, що займає пост; обробки всіх автомобілей, присутніх у черзі на момент прибуття; а також обслуговування автомобілей, що прибули надалі в інтервалі очікування, але з вищим пріоритетом, що забезпечує їхню пріоритетну обробку. Отже, у період очікування досліджуваного автомобіля реалізується стохастична ймовірність надходження вищопріоритетних автомобілей, які перетинають його в черзі, що фундаментально детермінує динаміку пріоритетної чергової системи масового обслуговування [2].

У роботі [3] детально описується процес обробки вантажівок на воротах складських або виробничих об'єктів. Зокрема, автори акцентують увагу на ключових етапах: прибутті транспортних засобів, їхньому входженні в чергу, безпосередньому завантаженні та розвантаженні біля воріт, а також завершальному виїзді з території. Цей підхід підкреслює циклічний характер операцій, де ефективність залежить від синхронізації всіх ланок ланцюга постачання.

Зазначена проблематика характерна не лише для пунктів обслуговування автомобільного транспорту. Ще більш гостро вона проявляється у сфері водного транспорту, де судна змушені

простоювати по кілька днів у черзі на обслуговування. Автори дослідження [4] акцентують увагу на негативних наслідках зростання вантажопотоків, яке підвищує ймовірність збоїв і затримок у перевезеннях. Будь-яка така затримка, за їхніми висновками, може спричинити порушення графіків роботи портів, постачань вантажів та ланцюгів постачань в цілому. Значні проблеми пов'язані з тривалими очікуваннями суден на обробку, а також неочікуваними затримками через погодні умови чи інші фактори, які призводять до зривів графіків і фінансових втрат. Крім того, брак інформації про готовність вантажу спричиняє рейдові простой суден, обмежуючи капітанів у виборі оптимального режиму руху. У контексті статті це джерело слугує основою для аналізу ризиків, пропонуючи інтеграцію інформаційних систем для мінімізації простоїв і підвищення стійкості логістичних мереж.

У роботі [5] розглянуто оптимізацію портових операцій, де автор пропонує зменшити час очікування та загальний час знаходження у системі суден через удосконалення процесів за допомогою методичного аналізу, що підвищує ефективність функціонування системи. Метод ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) виділяється як ефективний інструмент для підвищення ефективності роботи морського порту, на прикладі порту в провінції Songkhla Province (Таїланд). Крім того, планування графіків обслуговування вантажних автомобілів, зокрема модель Longest Processing Time (LPT), демонструє кращі результати в кейс-стаді для оптимізації зазначених операцій. Дослідження доводять, що зміна порядку обслуговування (черги) може мати значний вплив на ефективність роботи пунктів переробки. Слід зазначити, що висновки стосуються одного пункту переробки, що має один пост (кран розвантаження), що висуває певні обмеження на використання представлених результатів.

У статті [6] представлено базові принципи теорії черг та моделювання, а також визначено оптимальний режим обслуговування в системі черг для портового навантаження. Автори спираються на одновимірну модель, запропоновану попередніми дослідниками, яка фокусується на мінімізації витрат на обслуговування. На основі цього, вони пропонують нову двовимірну модель, яка дозволяє одночасно оптимізувати два ключові показники: ефективність обслуговування навантаження та кількість обладнання, забезпечуючи мінімальні витрати.

Метод апроксимації, залежний від стану системи, для оцінки довжини черги вантажних автомобілів на морських терміналах, з метою заповнення прогалів у існуючих підходах. На основі симуляції системи чергування вантажівок встановлено, що досягнення стабільного стану черги займає кілька годин, а ігнорування процесів формування черги (розсіювання) призводить до переоцінки (недооцінки) її довжини. Запропонований метод враховує як процеси формування, так і розсіювання черги для точнішої оцінки. Результати оцінки моделі демонструють, що вона забезпечує точніші та стійкіші оцінки порівняно з існуючими методами. Крім того, метод точно оцінює довжину черги, спричинену короткочасним перевантаженням у пікові години, що робить його корисним для аналізу ефективності заходів щодо зменшення заторів на морських терміналах. Модель також може застосовуватися для оцінки черг клієнтів у будь-яких сервісних об'єктах транспортної та логістичної галузі, де швидкість прибуття та обслуговування варіюється за часом, а перевантаження виникає в пікові періоди [7].

В роботі [8] запропоновано вдосконалений алгоритм мурашиної колонії для оптимізації процесу доставки і підбору контейнерів (з майданчиків до терміналу і навпаки) з використанням вантажного транспорту сторонніх компаній. Цей алгоритм модифікує правила оновлення феромонів порівняно з традиційним алгоритмом мурашиної колонії, а також вводить фактор впливу ширини часового вікна та ступінь відхилення часу в правилах переходу станів. Крім того, інтегровано алгоритм рою частинок (PSO) для автоматичного налаштування евристичних факторів впливу та факторів впливу феромонів, що покращує здатність уникати локальних оптимумів. Результати демонструють значне підвищення оптимізувальної здатності та стабільності порівняно з традиційним алгоритмом мурашиної колонії та алгоритмом змінного сусідства (VNS).

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною метою даного наукового дослідження є реалізація експериментального моделювання динаміки функціонування пункту обслуговування автомобільного транспорту протягом визначеного часового інтервалу, врахувавши стохастичних випадкових величини, що підкоряються заздалегідь ідентифікованим законам розподілу (зокрема, пуассонівському для інтервалів прибуттів та показниковому для тривалості сервісу), а також з неухильним дотриманням принципів відносної пріоритетності в процесі обслуговування, що дозволяє оптимізувати послідовність обробки заявок з урахуванням економічної ефективності та операційних обмежень. У контексті транспортних систем це дослідження набуває практичного значення, оскільки дозволяє прогнозувати та мінімізувати

простої вантажних автомобілів, враховуючи стохастичну природу процесів, і слугує основою для подальшої формалізації алгоритмів оптимізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тривалість перебування вантажного автомобіля у пункті обслуговування можна виразити як суму окремих часових інтервалів. Тривалість знаходження вантажного автотранспортного засобу в пункті обслуговування обумовлюється наступними факторами:

- час маневрування;
- час очікування обслуговування;
- час обслуговування;
- час прийому вантажу;
- час оформлення документів.

Час очікування обслуговування та безпосередній час обслуговування є стохастичними змінними з імовірнісною природою. На тривалість очікування впливають пріоритетність вантажу, що знаходиться в автомобілі, та час його прибуття до пункту обслуговування. Засновуючись на емпіричних даних щодо прибуття вантажних автомобілів до пункту обслуговування для пріоритету №1 (таблиця 1), проведений статистичний аналіз у програмному забезпеченні STATISTICA 12 мав на меті перевірку гіпотези про відповідність отриманого розподілу подій пуассонівському закону розподілу (рисунок 1). Для дослідження взято інтенсивності прибуття вантажних автомобілів з вантажем 1 пріоритету за добу (авт./добу) за період дослідження. Пуассонівський процес, як фундаментальна модель у теорії масового обслуговування, дозволяє адекватно описувати послідовність незалежних подій з фіксованою інтенсивністю (середньою кількістю прибуттів за одиницю часу). Такий підхід, широко застосовуваний у транспортних системах, полегшує аналітичне обчислення ключових метрик, таких як середній час очікування чи довжина черги.

Таблиця 1 – Емпіричні дані складових часу знаходження вантажних автомобілей у пункті обслуговування з вантажем 1 пріоритету.

Дата прибуття вантажного автомобіля	Час прибуття вантажного автомобіля	Дата початку обслуговування вантажного автомобіля	Час початку обслуговування вантажного автомобіля	Дата закінчення обслуговування вантажного автомобіля	Час закінчення обслуговування вантажного автомобіля	Дата виїзду вантажного автомобіля з пункту обслуговування	Час виїзду вантажного автомобіля з пункту обслуговування
30.06.2021	18:00:00	30.06.2021	18:14:00	30.06.2021	19:22:00	30.06.2021	19:59:00
30.06.2021	19:00:00	30.06.2021	20:15:00	30.06.2021	20:55:00	30.06.2021	21:25:00
30.06.2021	20:00:00	30.06.2021	22:20:00	30.06.2021	23:50:00	01.07.2021	0:45:00
01.07.2021	14:11:00	01.07.2021	17:10:00	01.07.2021	19:00:00	01.07.2021	19:40:00
01.07.2021	17:00:00	01.07.2021	20:40:00	01.07.2021	22:00:00	01.07.2021	22:40:00
01.07.2021	18:20:00	01.07.2021	20:30:00	01.07.2021	21:25:00	01.07.2021	22:00:00
01.07.2021	18:20:00	02.07.2021	4:32:00	02.07.2021	5:00:00	02.07.2021	5:55:00
01.07.2021	18:41:00	02.07.2021	0:10:00	02.07.2021	1:20:00	02.07.2021	2:20:00
01.07.2021	18:45:00	02.07.2021	2:20:00	02.07.2021	3:15:00	02.07.2021	4:30:00
01.07.2021	18:50:00	01.07.2021	21:45:00	01.07.2021	22:45:00	01.07.2021	23:35:00

01.07.20 21	18:55:00	01.07.2021	21:10:00	01.07.2021	22:35:00	01.07.2021	23:35:00
01.07.20 21	19:23:00	01.07.2021	21:00:00	01.07.2021	22:40:00	01.07.2021	23:40:00
01.07.20 21	19:34:00	02.07.2021	5:20:00	02.07.2021	6:20:00	02.07.2021	6:50:00
01.07.20 21	19:56:00	02.07.2021	1:40:00	02.07.2021	2:45:00	02.07.2021	3:20:00
01.07.20 21	22:30:00	02.07.2021	4:00:00	02.07.2021	5:20:00	02.07.2021	6:30:00
02.07.20 21	1:00:00	02.07.2021	3:00:00	02.07.2021	4:05:00	02.07.2021	4:40:00
02.07.20 21	10:12:00	02.07.2021	11:00:00	02.07.2021	12:20:00	02.07.2021	12:35:00
02.07.20 21	13:52:00	02.07.2021	15:50:00	02.07.2021	16:54:00	02.07.2021	17:10:00
02.07.20 21	15:09:00	02.07.2021	16:40:00	02.07.2021	17:56:00	02.07.2021	18:10:00
02.07.20 21	16:32:00	02.07.2021	19:00:00	02.07.2021	19:30:00	02.07.2021	19:50:00

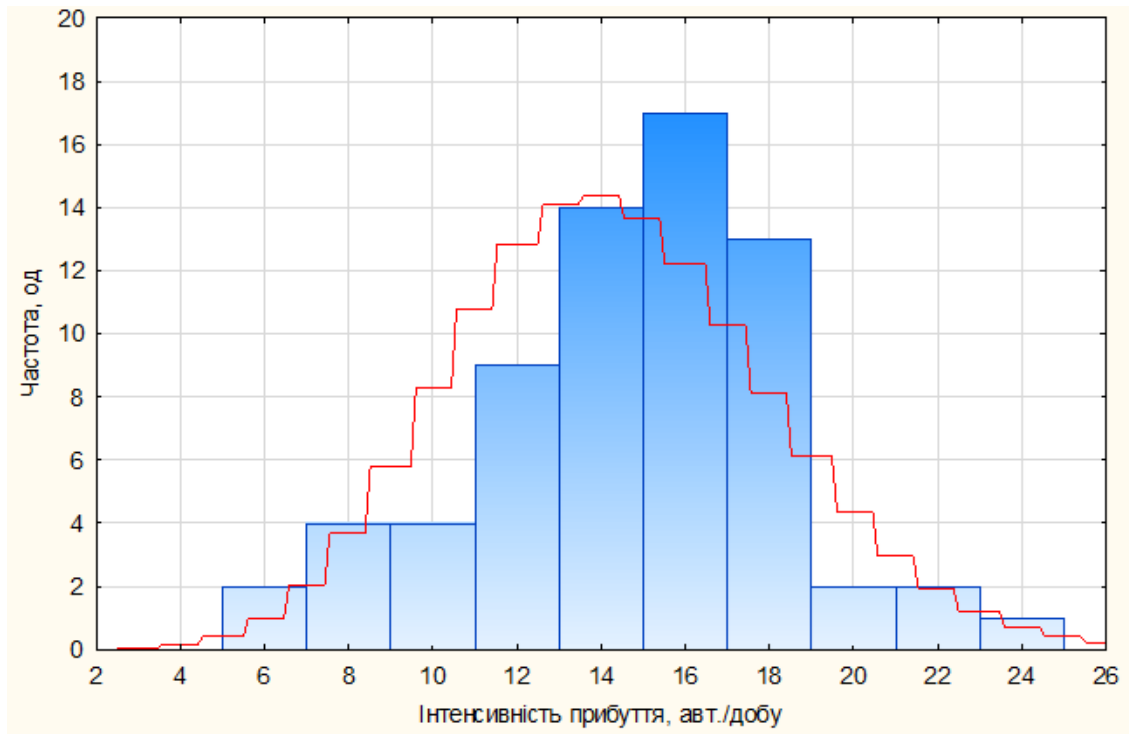


Рисунок 1 – Результат розрахунку закону Пуассона розподілу інтенсивностей прибуття вантажних автомобілей за добу протягом 70 днів автомобілів з вантажем І пріоритету до пункту обслуговування за допомогою STATISTICA 12

Проведений комплексний статистичний аналіз та обробка емпіричних даних, отриманих у ході спостережень за тривалістю обслуговування автомобілів у пункті обслуговування, дозволили встановити ступінь відповідності емпіричного розподілу часу обслуговування класичному експоненціальному закону розподілу. Ця закономірність підтверджується аналізом, наведеним на рисунку 2.

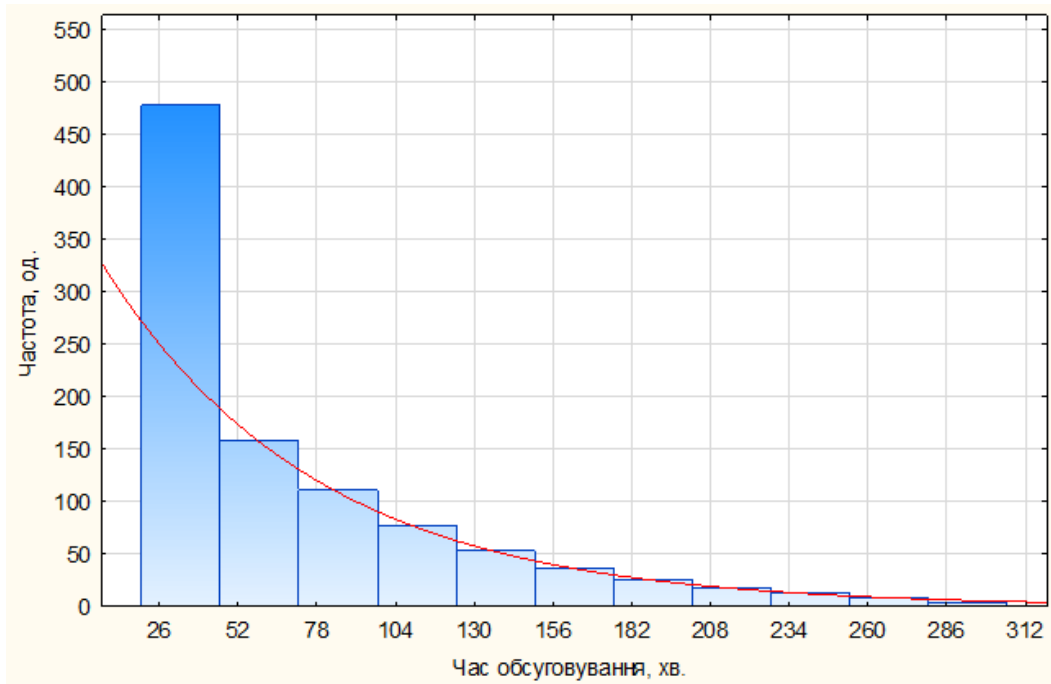


Рисунок 2 – Результат розрахунку експоненційного закону розподілу часу обслуговування вантажних автомобілей з вантажем 1 пріоритету за допомогою STATISTICA 12

Перевірка гіпотези про належність досліджуваної вибірки теоретичній кривій виду закону Пуассона проведена за критерієм відповідності Пірсона (таблиця 2)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_m)^2}{f_m}, \quad (1)$$

де k – число груп, на які розбито емпіричний розподіл,

f_i – спостережувана частота ознаки у i -й групі,

f_m – теоретична частота.

Кількість ступенів свободи визначається

$$df = k - s - 1, \quad (2)$$

де s – число параметрів передбачуваного розподілу, оцінених за даними вибірки.

Таким чином, отримані значення χ^2 підтверджують гіпотезу про розподіл інтенсивностей прибуття вантажних автомобілей до пункту обслуговування з вантажем 1 пріоритету та часу обслуговування цих автомобілей (таблиця 2).

Таблиця 2 – Показники визначення закону розподілу обсягу замовлень торгових точок «дрібних» форматів

Назва показника	Закон розподілу	Параметр розподілу	Показники визначення закону розподілу	
			$\chi^2_{\text{розр}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$ при $p=0,05$
Інтенсивність прибуття вантажних автомобілей з вантажем пріоритету за добу	Пуассона	14,706	9,895	15,5

Час обслуговування вантажних автомобілей вантажем пріоритету	3 1	Експоненційний	71,597	12,121	16,9
---	--------	----------------	--------	--------	------

Наступним етапом дослідження є моделювання інтенсивності надходження вантажного автотранспорту до пункту технічного обслуговування з використанням методу нормальної апроксимації, що ґрунтується на пуассонівському законі розподілу для дискретної випадкової величини. Застосовуючи програмне забезпечення Microsoft Excel, реалізовано генерацію псевдовипадкових значень зі стандартного нормального розподілу за допомогою вбудованої функції

$$NORM.S.INV(RAND()), \quad (3)$$

Отримані значення слугують основою для апроксимації та моделювання інтенсивності прибуття автомобілів до пункту обслуговування відповідно до наступної формули:

$$X = \mu + \sigma \times Z, \quad (4)$$

де μ – середнє значення фактичної інтенсивності прибуття автомобілів у пункту обслуговування;
 σ – середньоквадратичне відхилення інтенсивності прибуття автомобілів у пункт обслуговування;
 Z – згенерована величина стандартного нормального розподілу.

Отримані згенеровані значення інтенсивності надходження автотранспорту створюють основу для подальшого стохастичного моделювання пуассонівського процесу прибуття транспортних засобів до пункту технічного обслуговування. Зокрема, для симуляції моментів прибуття застосовується функція Microsoft Excel:

$$GAMMA.INV(RAND(), B, 1/\bar{X}), \quad (5)$$

де B – номер заявки;

\bar{X} – середнє значення згенерованої інтенсивності прибуття автомобілів у пункту обслуговування.

Застосовуючи експоненціальний закон розподілу, що є класичною моделлю для опису тривалості безпам'ятних процесів у системах масового обслуговування, реалізується стохастичне моделювання випадкових величин, які представляють час обслуговування транспортних засобів. Генерація таких величин проводиться за допомогою наступної функції Microsoft Excel:

$$\bar{T} \cdot \text{LOG}(RAND() \cdot 1), \quad (6)$$

де \bar{T} – середнє значення фактичного часу обслуговування автомобілів.

Емпіричні натурні дослідження, проведені в реальних умовах функціонування логістичних вузлів та транспортних хабів, переконливо засвідчили, що динаміці послідовності обслуговування вантажних автомобілів притаманна модель відносної пріоритетності, яка ґрунтується не на фіксованих абсолютних характеристиках транспортних засобів (таких як тип вантажу чи габаритні параметри), а на динамічній пропорційній оцінці пріоритетів, що враховує поточні операційні умови, рівень завантаженості системи та економічні фактори. Ця модель, на відміну від традиційних жорстких ієрархій, дозволяє гнучко адаптуватися до варіативності потоків, забезпечуючи баланс між швидкістю обробки критичних заявок і загальною стабільністю процесу. Водночас, аналіз показує, що преривання обслуговування недообробленого вантажного автомобіля на користь пізніше прибувшого транспортного засобу з вищим відносним пріоритетом (наприклад, через терміновість доставки чи вищу комерційну цінність) виявляється економічно неефективним з кількох перспектив: по-перше, воно призводить до зростання загальних витрат на простой, оскільки перерване обслуговування вимагає додаткового часу на відновлення стану системи; по-друге, спричиняє

перерозподіл ресурсів (персоналу, обладнання та простору), що знижує пропускну спроможність пункту в середньостроковій перспективі; по-третє, негативно впливає на операційну продуктивність, посилюючи ризик накопичення черг і знижуючи рівень задоволеності клієнтів. У контексті теорії масового обслуговування така неефективність може бути кількісно оцінена через метрики, як-от середній час перебування в системі та коефіцієнт завантаження, де преривання підвищує дисперсію стохастичних процесів, що, в свою чергу, ускладнює прогнозування та оптимізацію. Таким чином, впровадження моделі відносної пріоритетності без механізмів захисту від преривань (наприклад, порогових правил чи буферних зон) не лише не сприяє загальній ефективності, а й може призвести до системних втрат, які перевищують короткострокові вигоди від пріоритизації. Для подальшої формалізації цієї моделі рекомендується інтеграція стохастичних симуляцій, заснованих на пуассонівських процесах прибуттів, з урахуванням емпіричних даних з натурних експериментів, що дозволить розробити рекомендації щодо оптимізації дисциплін обслуговування в реальних транспортних мережах.

Результатом даного наукового дослідження слугуватиме комплексне стохастичне моделювання динаміки функціонування вантажного пункту переробки вантажу (вантажного терміналу чи логістичного вузла) з варіативною кількістю каналів обслуговування, зокрема, для конфігурацій з одним, двома та трьома постами обслуговування, що дозволить оцінити вплив масштабу ресурсів на ключові операційні метрики, такі як середня довжина черги, час очікування та загальна пропускну спроможність системи. Дане моделювання, засноване на класичних засадах теорії масового обслуговування (пуассонівському процесі прибуттів та показниковому розподілі часу обслуговування), враховуватиме принципи відносної пріоритетності для уникнення неефективних преривань сервісу, як це рекомендовано емпіричними дослідженнями транспортних систем. Такий підхід не лише ілюструє перехід від одноканальної до багатоканальної конфігурації, де зростання кількості серверів знижує коефіцієнт завантаження і стабілізує систему, але й надає практичні рекомендації щодо оптимізації:

Такий аналітичний підхід, заснований на теорії масового обслуговування, продемонструє, залежність зміни часу очікування обслуговування вантажного транспорту, де ключовий фактор тривалості його перебування в пункті, залежно від інтенсивності прибуттів вантажних автомобілів та їх обслуговування. Додатково буде оцінено час обробки прибувчих автомобілів і простою постів, що виникає через неузгодженість потоків. Це слугуватиме інструментом для прогнозування в логістиці, з симуляціями для сценаріїв навантаження.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ключовою вимогою до стохастичного моделювання процесу обслуговування вантажного автотранспорту в пункті переробки вантажу є мінімізація непродуктивних простоїв, які призводять до суттєвих втрат в економічному аспекті (зростання операційних витрат на паливо та час) для всього ланцюга доставки. Це досягається через оптимізацію черг, де простої зменшуються за рахунок балансу інтенсивності вантажного автотранспорту та пропускну здатністю пункту переробки вантажу.

ВИСНОВКИ

Прогнозування динаміки функціонування пунктів переробки вантажу та вантажного автотранспорту слугуватиме потужним аналітичним інструментом для обґрунтованого прийняття рішень у стратегічному плануванні комплексних логістичних систем доставки, з урахуванням множинності стохастичних (наприклад, варіативність прибуттів за пуассонівським процесом) та детермінованих факторів (як конфігурація каналів обслуговування), що в підсумку сприяє конструюванню високоточних моделей на базі теорії масового обслуговування для оптимізації пропускну спроможності та мінімізації втрат. Такий підхід не лише підвищує точність прогнозів ключових метрик, але й інтегрує емпіричні дані з реальних пунктів переробки вантажів, дозволяючи моделювати сценарії з різними рівнями навантаження та забезпечувати стійкість ланцюгів постачань у автотранспортних мережах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Федоров В. Ю., Ковцур К. Г., Птиця Н. В. Взаємодія видів транспорту: особливості обслуговування транспортних засобів в пунктах переробки вантажів. *Розвиток транспорту*. (4(15), 2023. 123-130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>

2. Kovtsur K., Ptytsia N., Liubiy Y., Fedorov V. An approach to determine vehicle idle time at unloading points. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2439, 020012-1–020012-11 <https://doi.org/10.1063/5.0068437>
3. Gultom, P., & Siregar, A. A. Analysis of the queuing system for the loading and un-loading of goods at PT Sinar Sosro Deli Serdang. *Journal of Mathematics Technology and Education*, 2(2), 2023. 231-247. <https://doi.org/10.32734/jomte.v2i2.9814>
4. Сагайдак О.І. Концепція оптимізації взаємодії судно-порт-вантаж з урахуванням наявних методик оцінки ризиків та використанням електронних технологій. *Розвиток транспорту*. 2(9), 2021. 64-77.
5. Woottichaiwat, S. Efficiency Improvement of Truck Queuing System in the Freight Unloading Process Case Study of a Private Port in Songkhla Province. *Science, Engineering and Health Studies*, 9(2), 2015. 52–58. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sehs/article/view/21467>
6. Xu Jingjing, Liu Dong. Queuing models to improve port terminal handling service. *Systems Engineering Procedia* 4:345-351. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.085>.
7. Wenrui Qu, Tao Tao, Bo Xie, Yi Qi. A state-dependent approximation method for estimating truck queue length at marine terminals. *Sustainability* 2021, 13(5), 2917. <https://doi.org/10.3390/su13052917>.
8. Huang P, Wang H, Tan F, Jiang Y, Cai J. Optimization of external container delivery and pickup scheduling based on appointment mechanism. *PLoS ONE* 20(2), 2025. e0318606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318606>

REFERENCES

1. Fedorov, V. Yu., Kovtsur, K. H., & Ptytsia, N. V. (2023). Interaction of transport modes: Features of servicing vehicles at cargo handling points. *Development of Transport*, 4(15), 123–130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>
2. Kovtsur, K., Ptytsia, N., Liubiy, Y., & Fedorov, V. (2021). 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>
3. Gultom, P., & Siregar, A. A. (2023). Analysis of the queuing system for the loading and unloading of goods at PT Sinar Sosro Deli Serdang. *Journal of Mathematics Technology and Education*, 2(2), 231–247. <https://doi.org/10.32734/jomte.v2i2.9814>
4. Sahaidak, O. I. (2021). Concept of optimizing the interaction between ship, port, and cargo considering existing risk assessment methods and the use of electronic technologies. *Development of Transport*, 2(9), 64–77.
5. Woottichaiwat, S. (2015). Efficiency improvement of truck queuing system in the freight unloading process: Case study of a private port in Songkhla Province. *Science, Engineering and Health Studies*, 9(2), 52–58. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sehs/article/view/21467>
6. Xu, J., & Liu, D. (2011). Queuing models to improve port terminal handling service. *Systems Engineering Procedia*, 4, 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.085>
7. Qu, W., Tao, T., Xie, B., & Qi, Y. (2021). A state-dependent approximation method for estimating truck queue length at marine terminals. *Sustainability*, 13(5), 2917. <https://doi.org/10.3390/su13052917>
8. Huang, P., Wang, H., Tan, F., Jiang, Y., & Cai, J. (2025). Optimization of external container delivery and pickup scheduling based on appointment mechanism. *PLOS ONE*, 20(2), e0318606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318606>

K. Kovtsur, V. Fedorov. Development of an experimental plan for the truck maintenance process at recycling points

The paper discusses the development of a plan for experimental modeling of the process of servicing trucks at cargo handling points, aimed at improving logistics system efficiency and reducing vehicle downtime. The main focus is on simulating vehicle arrival and servicing dynamics under stochastic conditions, considering the principle of relative priority in their order of service. Using empirical data, the laws governing the probability distribution of random variables that characterize freight transport arrival times and service durations were identified. It was found that the arrival process follows the Poisson distribution, and service duration follows the exponential distribution, confirmed by statistical verification using Pearson's criterion.

The paper supports the idea that queuing theory and simulation modeling methods are useful for evaluating the efficiency of cargo processing points. A methodological approach to stochastic modeling of

the service process is proposed, based on algorithms for randomly generating arrival intervals and service durations within the Microsoft Excel environment using functions that implement Poisson and exponential distributions. The model incorporates the principle of relative priority, enabling adaptive changes in service sequences based on current operating conditions and economic considerations.

Study results indicate that implementing multi-channel service systems (with one to three stations) can significantly decrease average queue length and waiting times, while increasing system stability under varying traffic levels. This approach allows for predicting how long a vehicle stays in the system, identifying time losses, and providing recommendations for optimal resource allocation at service points. The findings can also be used for further mathematical formalization of logistics performance indicators and applied to other transport networks.

Overall, this research advances analytical and predictive methods in transport logistics, offering opportunities to reduce freight transport downtime and enhance the economic stability of cargo handling systems in current conditions.

Key words: truck, modeling, freight transportation, processing point, queue, relative priority, waiting time.

КОВЦУР Катерина Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kovtsyur@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>.

ФЕДОРОВ Віталій Юрійович, асистент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: vitaliiyf@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0940-6774>

Kateryna KOVTSUR, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kovtsyur@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>.

Vitalii FEDOROV, Assistant of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: vitaliiyf@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0940-6774>

Дата надходження статті до видання: 27.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1924

Кондратюк М.А.
Національний транспортний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ КАТЕГОРІЇ N1

На перетині розвитку таких процесів як посилення екологічних вимог до автомобільного транспорту, невпинний процес урбанізації, зростаюча залежність від імпорту палива, збільшення ролі легкого комерційного транспорту для доставки в торгівлі в рамках розвитку електронної комерції, критичного значення набуває ефективність силової установки автомобілів категорії N1. Автомобілі категорії N1 займають значну частку автопарку і згідно даними виробників більше 75% робочого часу працюють в міському режимі руху. Такому режиму роботи найбільш відповідним виглядає використання гібридного силової установки, які розвиваються останні 20 років та широко впроваджуються в легковому транспорті. Виявлено значне відставання в наукових дослідженнях та практичній реалізації гібридних систем для цього типу транспорту. Для заповнення цієї прогалини проведено практичне дослідження умов експлуатації популярного комерційного автомобіля (MERSEDES SPRINTER 208 cdi, Євро 6) в реальних умовах експлуатації на протязі типового робочого дня, це дозволило забезпечити емпіричну основу для подальшого математичного моделювання. Шляхом аналізу даних з бортового комп'ютера та OBDII-сканера було визначено особливості експлуатаційного циклу, зокрема значну частку руху накатом 35% шляху (44,2км), що підтверджує потенціал для рекуперації енергії та використання гібридної силової установки в режимі частих зупинок. На даному етапі проведено попередній аналіз даних зібраних з бортового комп'ютера в розрізі 20-и зупинок, отримані дані систематизовані в табличну форму на основі яких побудовані графіки зміни швидкості та витрати палива. Зібрані дані за допомогою OBDII-сканера включаючи швидкість, прискорення, навантаження на двигун, поздовжній нахил дороги та вплив манери водіння будуть використані для подальшого більш детального аналізу. Отримані емпіричні дані ляжуть в основу для подальшого математичного моделювання, що дозволить розробити оптимальні конфігурації гібридної силової установки, включаючи потужність двигуна внутрішнього згоряння та електродвигуна, а також ємність тягової батареї. Результати досліджень сприятимуть не тільки підвищенню паливної ефективності, що призведе до збільшення конкурентоспроможності транспортних компаній завдяки зниженню сукупної вартості володіння (TCO), як це підтверджують останні міжнародні дослідження (наприклад, TCO HEV-вантажівок є найнижчою), а й сприятиме зниженню шкідливих викидів особливо в міському циклі, що позитивно вплине на екологічну ситуацію, а саме якість повітря.

Ключові слова: автомобіль, гібридний силовий привід, умови експлуатації, швидкість, паливна ефективність

ВСТУП

Основним завданням будь якого транспортного засобу є перевезення людей та вантажу з необхідною швидкістю і водночас з найменшою витратою ресурсів. Для підвищення тягово-швидкісних властивостей та паливної ефективності науковці та інженери оцінюють, намагаються мінімізувати вплив ряду сил, адаптуючи різні системи автомобіля для їх подолання, а саме - сил інерції (залежить від маси), сил опору дороги (опір коченню та нахил дороги) та сили опору повітря. Тому постійно намагаються зробити автомобіль легшим, обтічним та плавним. Ключовим засобом, методом досягнення оптимальної продуктивності є використання силових установок з найвищим ККД та трансмісії, яка б забезпечувала роботу двигуна в оптимальному режимі. Незважаючи на суттєве збільшення продуктивності автомобілів з моменту їх масового використання, такі процеси як стрімке збільшення парку автомобілів, а також посилення процесу урбанізації погіршує екологічні показники навколишнього середовища на стільки, що 90% населення світу дихає повітрям яке не відповідає стандартам ВООЗ [1], а циклічні нафтові кризи та вичерпність ресурсів підвищує ціни на паливо з подвійною силою.

Автомобільний транспорт продукує 18% світових викидів CO₂, 13% з яких припадає на вантажні автомобілі категорії N1[3]. Особливо гостро питання постає під час руху містом. У міському режимі руху ефективність роботи традиційного двигуна внутрішнього згоряння значно падає, а рівень викидів шкідливих речовин, шумового забруднення, економічних збитків зростає. [2]. Згідно даних виробників легкий комерційний транспорт категорії N1 на 75% робочого часу працюють в міському режимі, використовуючи переважно традиційний ДВЗ.

Останнім часом швидко набувають популярність електромобілі, наразі випускаються ряд моделей, що здатні проїжджати до 500-600 км на одній зарядці. Знижені податки, гарантія на батарею дозволяють збільшити кількість власників електромобілів, проте ці автомобілі мають ряд недоліків. Це більш висока ціна, довгий час заряджання, стрімке падіння залишкової вартості, та екологічні

наслідки, пов'язані з більшою масою, високим крутним моментом, що призводить до надмірного спрацювання шин та проблеми, пов'язані з видобутком літію, утилізацією тягових акумуляторів.

Найбільш оптимальним збалансованим та практичним рішенням в оглядовій короткостроковій перспективі є ширше впровадження гібридних силових установок для автомобілів категорії N1, де до традиційного ДВЗ додають потужний електродвигун з потужним акумулятором для допомоги чи повноцінного руху автомобіля на електротязі. Гібридні силові установки поєднують в собі переваги як традиційних двигунів внутрішнього згоряння, так і електричних моторів. Це досягається за рахунок того, що електродвигун має значно більший крутний момент на низьких обертах, на відміну від ДВЗ, що дозволяє ефективно розганятися. Під час гальмування та руху по інерції відбувається зворотний процес: електродвигун в режимі генератора починає заряджати батарею, тим самим заощаджуючи гальмівну систему. Отже спуски та необхідність гальмування заряджають батарею, що збільшує запас ходу, що робить їх новим джерелом енергії.

Поєднання роботи ДВЗ і електричного двигунів у гібридних автомобілях дозволяє досягти оптимального балансу між паливною ефективністю та тягово-швидкісними характеристиками, а головне може дозволити знизити витрати пального до 50 % в міському циклі [3]. Так як гібридні силові установки поєднують в собі переваги як традиційних двигунів внутрішнього згоряння та електричних моторів, це дозволяє їм бути більш економічними, екологічними, потужними та витривалими, ніж чисто електричні моделі, особливо для тривалих маршрутів.

Наразі провідні країни-виробники автомобілів, такі як Китай, Японія та країни Європейського Союзу, активно впроваджують різноманітні стимули для придбання гібридних транспортних засобів, намагаючись збільшити їх частку на ринку. Наприклад, у Китаї поставлена мета, щоб до 2035 року гібридні електромобілі (HEV), які продаються на внутрішньому ринку, становили 100% від загальної кількості легкових автомобілів на традиційному паливі (Китайське товариство автомобільної інженерії, 2020). В Європі, де транспорт доставки становить чверть викидів, гібридизація дизельних автомобілів є ключовим рішенням. Зони з низьким рівнем викидів, обмеження CO₂ до 147 г/км (ЄС, 2020 рік) стимулюють перехід на HEV, PHEV та EV.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для оцінки ефективності гібридних систем використано результати дорожніх випробувань, проведених в різних країнах, а також аналіз економічних показників експлуатації. Після відомого скандалу, так званого «Дизельгейт», спостерігається збільшення кількості дорожніх випробувань над лабораторними, що дозволяють отримати реальні дані, які в рази більші. Результати останніх досліджень у США, Канаді, Латинській Америці, Італії, Китаї демонструють, що використання повноцінних гібридних силових установок HEV та PHEV для автомобілів значно зменшує витрати палива та рівень шкідливих викидів, а гібридні технології на сьогодні є першим кроком розвитку. Зокрема, у США Кер'ялайнер та ін. [5] провели дорожні випробування, у яких порівняли реальні викиди наночастинок, твердих частинок та сажі від гібридного PHEV автомобіля (Volkswagen Passat 2017), що підключається, у порівнянні зі звичайними бензиновими автомобілями. Умови випробування - це 2 маршрути з різними умовами, місто та шосе. Проведене дослідження показало, що PHEV має нижчий рівень викидів твердих частинок майже у 10 разів.

Ван та ін. [6] провели дорожні випробування з одним гібридом PHEV з паралельним підключенням, оцінюючи економічність та рівень шкідливих викидів (CO, NO_x та твердих частинок) в залежності від рівня заряду батареї та режиму роботи ГСУ. Їм вдалося виявити, що рівень питомої витрати енергії був на 45% вищим за оцінками WTW (від свердловини до коліс) в режимі підтримки заряду батареї (ДВЗ працює) порівняно з режимом розряду батареї, коли автомобіль рухається в режимі електромобіля. Хуанг Ронг та ін. [7] у 2022 році провели дорожні випробування, оцінюючи переваги звичайних HEV над традиційними ТЗ з ДВЗ в контексті споживання палива та рівня шкідливих викидів у різних режимах роботи, а саме в спокійній та агресивній манері водіння. Гібридна силова установка мала на 41% кращу паливну економічність в міських умовах, а викиди CO₂ і NO_x були знижені на 33% і 61%, однак кількість твердих частинок та CO було вищим ніж у транспортних засобів з традиційними двигунами. Це пояснюється частими зупинками та перезапусками ДВЗ для HEV. У зв'язку з цим для комплексного порівняння паливної економічності та показників шкідливих викидів був запропонований індекс оцінки реального коефіцієнту відповідності. Це доводить необхідність поєднання стратегій орієнтованих на паливну економічність та контроль викидів.

Роберта де Рубіо та ін. (2022) [8] для оцінки ефективності гібридної силової установки використали програмне забезпечення ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR). За його допомогою

проведено моделювання їздових циклів, зокрема Світового узгодженого циклу випробувань для легкових транспортних засобів (WLTC). Була створена віртуальна модель комерційного дизельного гібридного електромобіля з паралельною конфігурацією, яку верифікували за допомогою експериментальних даних, отриманих від реального дизельного двигуна. Результати моделювання показали значну перевагу гібридної системи, зокрема у режимі виснаження заряду (Charge Depleting) зафіксовано зниження споживання палива та викидів CO_2 до 73%, а оксидів азоту — до 69%. У режимі підтримки заряду (Charge Sustaining) ці показники становили 30% для палива та CO_2 та 15,6% для оксидів азоту.

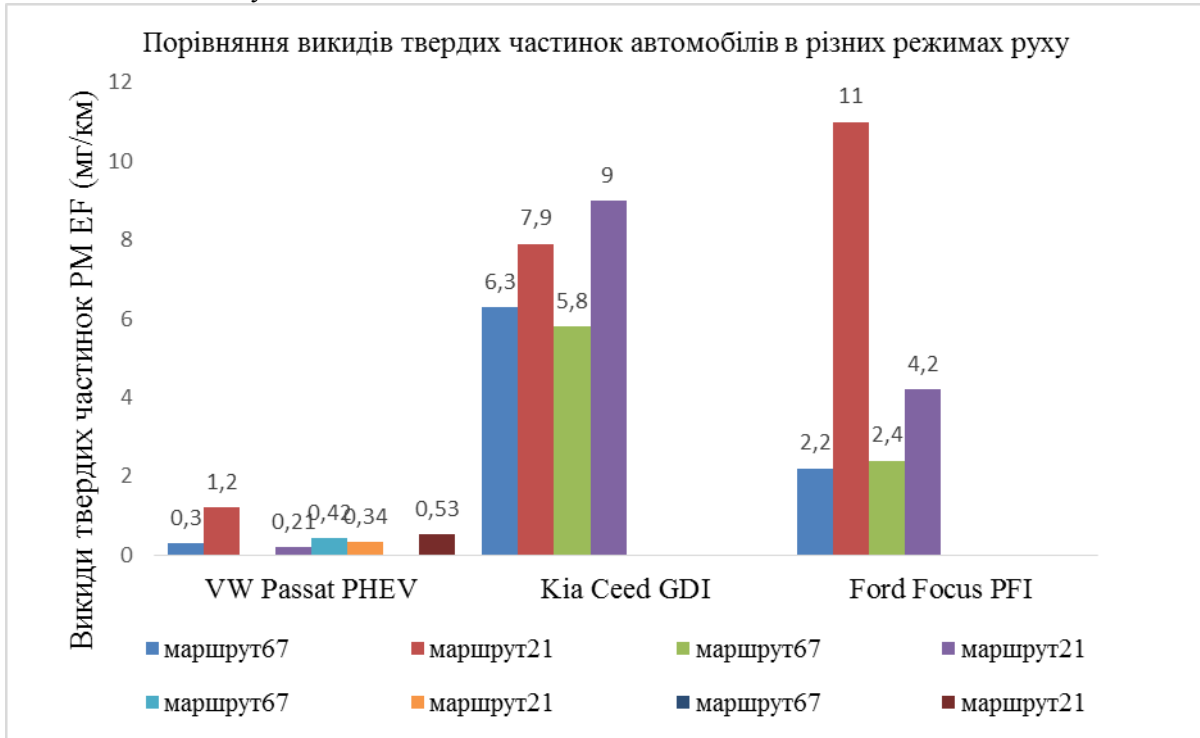


Рисунок1- Діаграма порівняння рівня шкідливих викидів PHEV проти ДВЗ [4]

Шапалко та ін. [3] довели, що застосування ГСУ на вантажних автомобілях, з точки зору економії палива та зменшення шкідливих викидів, значно ефективніше, ніж на легкових.

Згідно досліджень 2023 р. у Китаї, де аналізуються екологічні (WTW –викиди CO_2 від свердловини до коліс) та економічні показники (ТСО-сукупна вартість володіння) дизельних, звичайних гібридних та гібридних вантажівок з можливістю підключення до мережі з різними коефіцієнтами гібридизації і ємностями акумуляторів 50, 100 и 150 кВт/г шляхом порівняння викидів CO_2 і щільності енергії акумулятора було визначено оптимальність відстаней поїздки від 100 до 800 км [9].

Ефект економії пального для мікро-HEV, MHEV та HEV заощаджує 3,5%, 16% і 20% витрати дизельного пального порівняно з традиційною силовою установкою у змішаному циклі. Передбачається, що вартість зарядки, акумуляторів через поширеність та розвиток технологій буде знижуватися, а ціна на нафтове пальне буде стабільно зростати. Авторами було проведено аналіз загальної вартості володіння з точки зору вартості вантажного автомобіля, вартості пального та витрат на обслуговування, рис.2 [9].

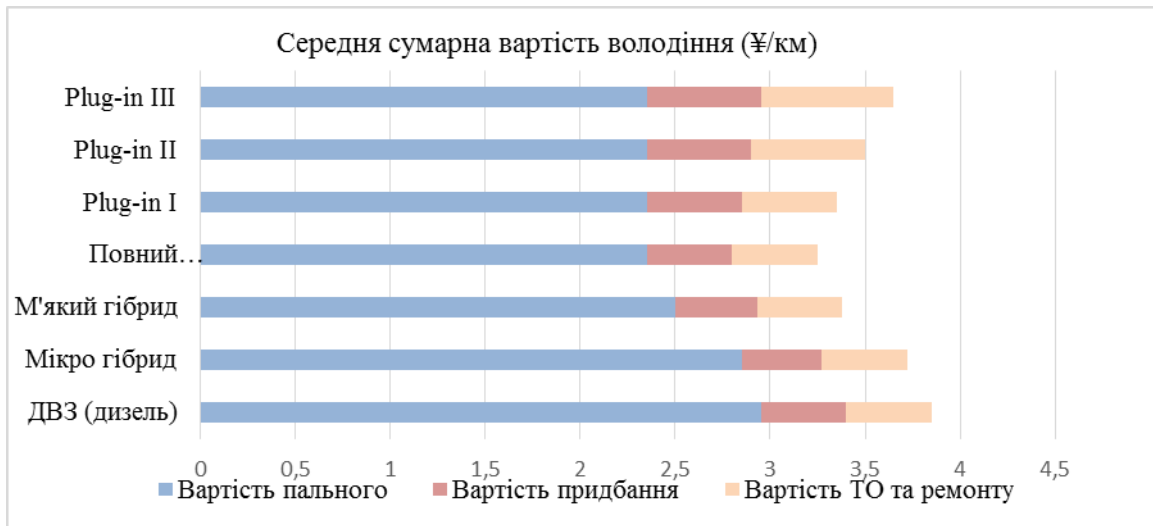
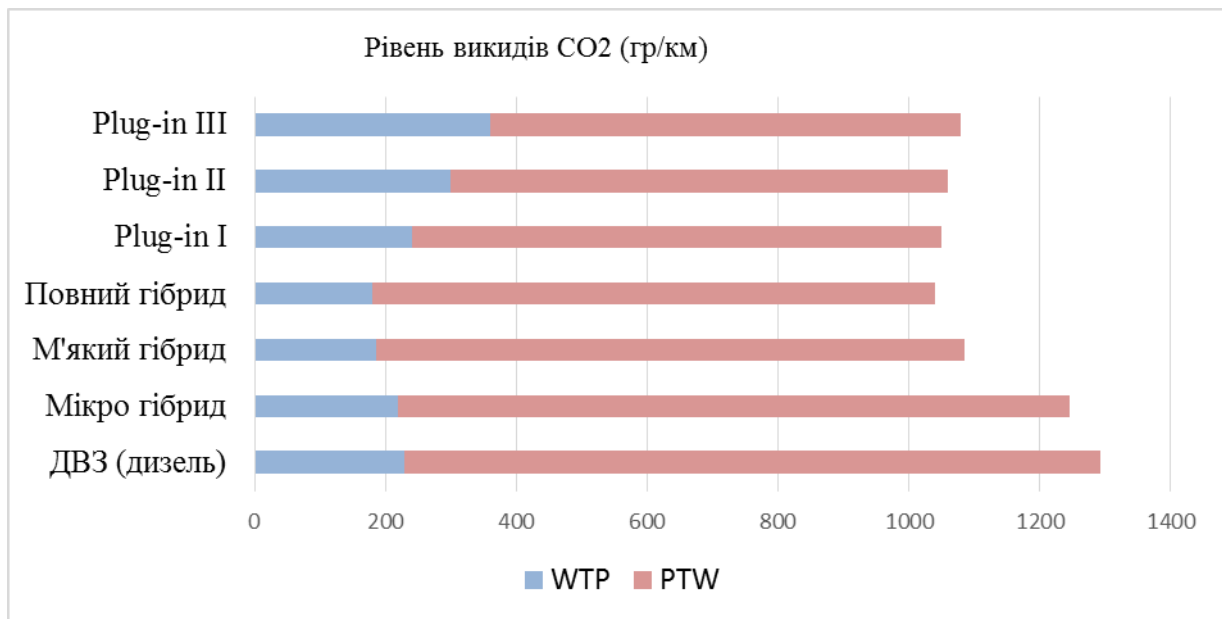


Рисунок 1.3. Порівняння вартості володіння в залежності від типу СУ[9]

HEV продемонстрував найнижчу TCO. Сукупна вартість Plug-in збільшувалася з ємністю батареї, і з найбільшою батареєю наближається до сукупної вартості утримання дизельного двигуна. Це пов'язано з використанням комерційних зарядних станцій ті більшої ціні на покупку автомобіля з більшою батареєю. У цій же роботі проведено моделювання негативного впливу на екологію, а саме скільки гр/км CO₂ буде виділено важкими вантажівками в залежності від ступеня гібридизації з точки зору від видобутку до баку WTP, та від баку до коліс PTW, рис. 3 [9].

Рисунок 3 - Порівняння викидів CO₂ в залежності від типу СУ. [9]

Найнижчі викиди CO₂ WTW були не у Plug-in з найбільшим АКБ, а у HEV. Одночасно викиди CO₂ WTW plug-in збільшувалися зі збільшенням ємності батареї. Доведено, що 6 типів гібридних електричних вантажівок мають кращі екологічні та економічні показники, ніж дизельні вантажівки з погляду викидів WTW CO₂ і сукупної вартості володіння. Було виявлено, що гібридні електричні вантажівки з високими коефіцієнтами гібридизації працюють найкраще. У майбутньому гібридні електричні вантажівки з великими акумуляторами, що підключаються, працюватимуть найкраще на коротких відстанях. І навпаки, під'єднувальні (PHEV) гібридні електричні вантажівки з невеликими акумуляторами будуть кращими для середніх і великих відстаней. Це в основному пов'язано зі збільшенням частки екологічно чистої електроенергії та зниженням цін на зарядку. Загалом, перевага Plug-in TCO зменшується зі збільшенням щоденної відстані пробігу, цін на зарядку та зниженням цін на дизельне паливо. На даний момент для Китаю в структурі виробництва

електроенергії, цін на пальне, зарядку, акумулятори силова установка звичайний гібрид NEV вважається найбільш ефективною. [9]

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є експериментальне дослідження тягово-швидкісних властивостей і паливної економічності вантажних гібридних автомобілів категорії N1 у реальних умовах експлуатації.

Гібридні вантажівки використовують таких типів:

- паралельні гібриди: ДВЗ та електродвигун працюють одночасно або по черзі;
- послідовні гібриди: ДВЗ використовується для заряджання акумулятора, а електродвигун приводить в рух колеса;
- комбіновані гібриди: Поєднують в собі елементи паралельної та послідовної схем. Є кращим вибором, адже найбільший ККД, мінімізуючи втрати послідовної схеми на перетворення енергії з механічної в електричну та з електричної в механічну

Ключовим показником для визначення типу гібридних автомобілів є коефіцієнт гібридизації, що характеризує залежність потужності тягового електродвигуна до сумарної потужності ГСУ:

$$\text{Hybridization factor} = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{ICE}} = \frac{P_{EM}}{P_{vehicle}}$$

де P_{EM} і P_{ICE} — максимальні потужності електродвигуна та ДВЗ, яка доступна для приведення ТЗ до руху.

За цим показником у табл. 1 наведені характерні ознаки типів гібридів [2].

Таблиця 1 - Характерні ознаки типів гібридів [2]

Тип	Режим роботи			
	Система «старт-стоп»	Регенеративне гальмування	Електричне підвищення	Режим виснаження заряду. Режим перезаряджання
Мікрогібрид	+	-	-	-
М'який гібрид	+	+	-	-
Повний гібрид	+	+	+	-
Плагін гібридний	+	+	+	+

Для досягнення мети дослідження проведені дорожні випробування. При цьому безпосереднє вимірювання параметрів руху автомобіля (швидкість, прискорення, витрата палива, навантаження на двигун, температури, зміна поздовжнього нахилу дороги, напрям вітру) в реальних умовах експлуатації надає максимально достовірні дані, оскільки вони отримуються в реальних умовах та дозволяють виявити непередбачені ефекти взаємодії систем, незважаючи на вартість та часові витрати, складність відтворення і повторюваності всіх можливих умов експлуатації.

Предметом дослідження стали умови експлуатації популярної моделі класу N1, яку щодня використовують в компанії для розвезення товарів широкого вжитку повний робочий день в Києві та області. Це вантажний автомобіль MERSEDES SPRITNER 208 cdi, дизель об'ємом 2143см³, 105кВт, клас екологічності Євро 6. Автором було проведено дослідження цього автомобіля в реальних умовах експлуатації на заданому маршруті, у звичайний робочий день, для чого складено звіт по пробігу.

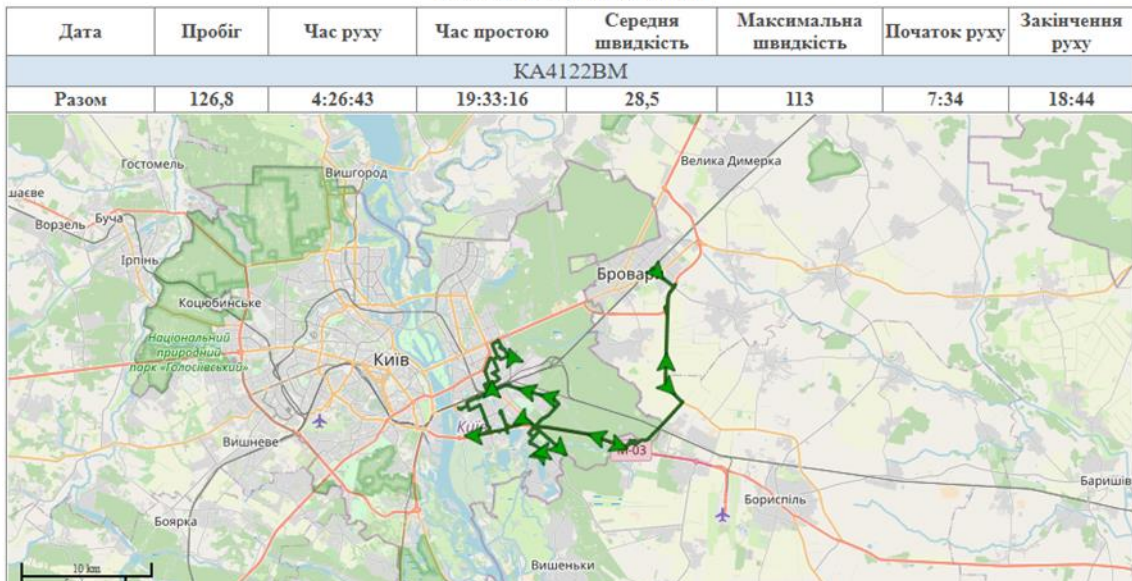
Звіт по пробігуза період з 09.05.2025 0:00:00 по 09.05.2025 23:59:59 (UTC +3)
Generation date: 12.05.2025 12:22:11

Рисунок 4 - Маршрут руху автомобіля станом на 9 травня 2025р.

На першому етапі був виконаний попередній аналіз паливної ефективності, швидкості та манери водіння. Для цього використовувалися дані бортового комп'ютера автомобіля, що відповідає екологічному стандарту Євро 6 з вбудованою системою навчання для економічного водіння. Протягом повного робочого дня досліджуваного автомобіля фіксувалися показники витрати палива та оцінка стилю керування водія під час близько 20 зупинок на маршруті на основі звітів про поїздку на кожному відрізку шляху. Програма знімає бали за різкий розгін та гальмування, заохочує перемикає передачі в потрібний момент та максимально використовувати силу інерції, рис. 5.



Рисунок 5 – Параметри, що фіксуються бортовим компютером, за поїздку

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані дані були систематизовані у табличній формі, на основі чого були побудовані попередні графіки витрати палива та швидкості руху, рис. 6.

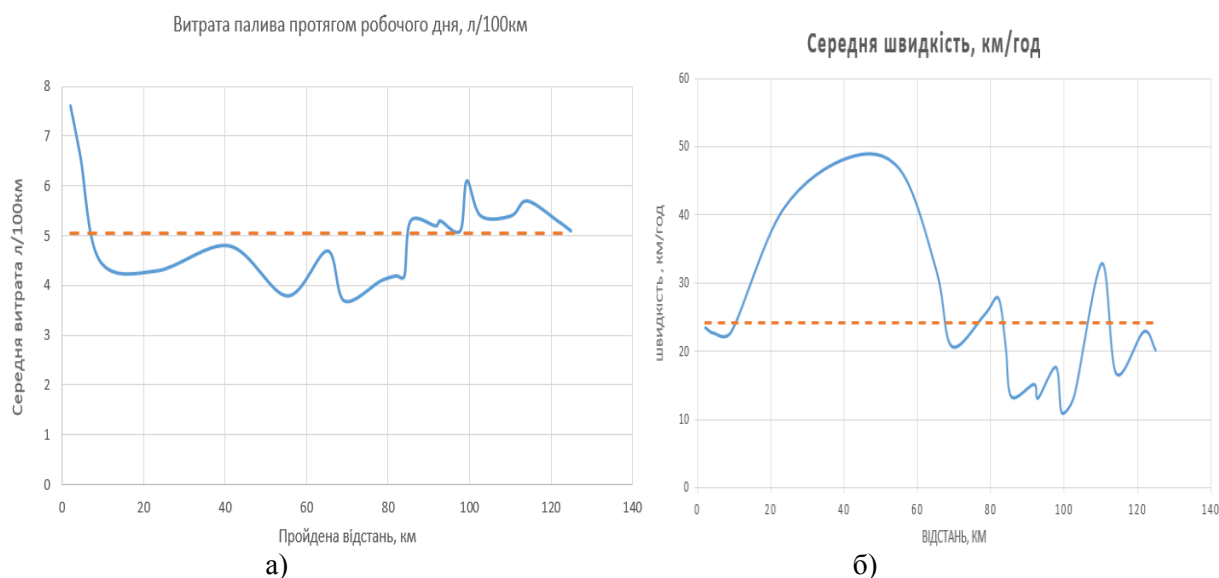


Рисунок 6 - Зміни середньої витрати палива (а) і середньої швидкості руху (б) на маршруті.

Графік, рис. 6а, демонструє природне збільшення витрати палива на коротких відстанях та особливо на не прогрітому двигуні та зниження витрати при русі на трасі та в місцях з нахилом дороги. При цьому встановлено, що 35% маршруту, а це 44,2км, було подолано накатом (за рахунок сили інерції та нахилу дороги), що відповідає попереднім дослідженням.

Графік, рис. 6б, демонструє природне збільшення середньої швидкості на автомагістралі Київ-Бровари та її зниження на коротких відстанях у місті. При цьому показники середньої швидкості бортового ПК були звірені з даними GPS і встановлено, показники ПК завищують швидкість на 3 км/год.

На результати досліджень паливної економічності і середньої швидкості руху суттєво впливає манера водіння. Так, манера професійного водія вантажівки демонструє кращу ефективність на 10% (85 балів проти 75), що говорить про кращу прогнозованість, а отже краще використання сили інерції та менш різке прискорення, що в даному випадку зменшує силу опору інерції, що направлена у зворотній бік від руху автомобіля.

У результаті проведених досліджень встановлено:

- пройдена 125 км;
- середня витрата палива 5,07 л/100 (показники витрати палива від бортового ПК були перевірені методом заправки «від баку до баку», дані занижені на 6%);
- середня швидкість на маршруті 24 км/год 24;
- середня швидкість руху накатом 44,2 км;
- час руху без простоїв 5 годин, 10хв.

Отримано масив даних за допомогою OBDII-сканера 7 МБ і отримані графіки будуть використані на наступних етапах для більш детального аналізу швидкості руху, витрати палива, впливу поздовжнього нахилу дороги на ці показники, а також використаної потужності двигуна. Дослідження складного масиву факторів, що впливають на рух автомобіль, дозволить гармонізувати гібридну систему досліджуваного автомобіля.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.

В умовах стрімкої урбанізації, посилення екологічних викликів, пов'язаних з викидами автомобільного транспорту та залежністю від імпорту пального питання підвищення паливної ефективності та зниження шкідливих викидів відпрацьованих газів набуває критичного значення. Незважаючи на значні успіхи у впровадженні гібридних технологій у легкових автомобілях, їхнє дослідження та практична реалізація для малих вантажних автомобілів категорії N1 значно відстає, що створює критичну прогалину в науковому знанні та інженерній практиці. Дане дослідження заповнює цю прогалину, аналізуючи реальні умови експлуатації у міському та приміському режимах популярного комерційного транспорту протягом повного робочого дня. Отримані дані та їх подальше використання для математичного моделювання дозволять не лише розробити оптимальні конфігурації, параметри потужності ДВЗ та електродвигуна, ємності тягової батареї, а й сприятимуть економічній перевазі та конкурентоздатності виробників та власників транспортних компаній

одночасно зменшуючи їхній негативний вплив на довкілля. Таким чином, результати цієї роботи мають значну теоретичну та практичну цінність для поліпшення ефективності вантажних гібридних автомобілів категорії N1.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень на обраному маршруті довжиною 125 км встановлені середня витрата палива, середня швидкість, час простою тощо. Шляхом аналізу даних з бортового комп'ютера та OBDII-сканера було визначено особливості експлуатаційного циклу, зокрема значну частку руху накатом (35% шляху), що підтверджує потенціал для рекуперації енергії.

Отримані емпіричні дані ляжуть в основу для подальшого математичного моделювання, що дозволить розробити оптимальні конфігурації гібридної силової установки, включаючи потужність двигуна внутрішнього згоряння та електродвигуна, а також ємність тягової батареї. Результати дослідження мають значну практичну цінність, оскільки можуть сприяти підвищенню паливної ефективності та зниженню шкідливих викидів, що, своєю чергою, підвищить конкурентоспроможність транспортних компаній та зменшить їхній негативний вплив на довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.D Lekaki, M Kastori, G Papadimitriou, G Mellios, D Guizzardi, M Muntean, M Crippa Road transport emissions in EDGAR (emissions Database for global atmospheric research) Atmospheric Environment, 2024•Elsevier

2.Гібридні силові установки легкових автомобілів : навчальний посібник. – Запоріжжя : НУ Запорізька політехніка», 2021. – 193 с. ISBN 978-617-529-282-2.

3.Шалапко Д.О. Гібридна силова установка вантажного автомобіля як перспективний напрямок розвитку галузі / Шалапко Д.О., Пирисунько М.А., Руденко О.В., Андрієнко Г.О. // Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті / Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції Харків: ХНАДУ. – 2018, с. 230-234

4.Haoran Hu, Simon J. Baseley, Xubin Song (2021) Advanced hybrid Powertrains Commercial vehicles.SAE International ISBN: 978-1-4686-0136-7

5.Karjalainen, P. Leinonen, V.; Olin, M.; Vesisenaho, K.; Marjanen, P.; Järvinen, A.; Simonen, P. Markkula, L.; Kuuluvainen, H.;Keskinen, J.; et al. (2024) Real-world emissions of nanoparticles, particulate mass and black carbon from a plug-in hybrid vehicle compared to conventional gasoline vehicles. Environ. Adv. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100454>

6.Yachao Wang, Yi Wen, Qinggong Zhu, Jiabin Luo, Zhengjun Yang, Sheng Su, Xin Wang, Lijun Hao, Jianwei Tan, Hang Yin, Yunshan Ge(2022) Real driving energy consumption and CO2 & pollutant emission characteristics of a parallel plug-in hybrid electric vehicle under different propulsion modes. Energy Volume 244, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123076>.

7.Rong Huang, Jimin Ni, Teng Zheng, Qiwei Wang, Xiuyong Shi, Zhenxu Cheng (2022) Characterizing and assessing the fuel economy, particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes,Atmospheric Pollution Research, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101597>.

8.Roberta De Robbio, Maria Cristina Cameretti, Ezio Mancaruso, (2022) Investigation by modelling of a plug-in hybrid electric commercial vehicle with diesel engine on WLTC, Fuel,Volume 317,ISSN 0016-2361 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123519>

9.Feiyang Xu, Curran Crawford, Yanbiao Feng, Zhenhong Lin, Shunxi Li (2023) Environment-economic analysis of diesel, hybrid electric, plug-in hybrid electric trucks in China. Research Part D: Transport and Environment, Volume 117, ISSN 1361-9209 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103661>

REFERENCES

1.D Lekaki, M Kastori, G Papadimitriou, G Mellios, D Guizzardi, M Muntean, M Crippa Road transport emissions in EDGAR (emissions Database for global atmospheric research) Atmospheric Environment, 2024•Elsevier

2.Hybrydni sylovi ustanovky lehkovykh avtomobiliv: Navchalnyi posibnyk [Hybrid Power Plants for Passenger Cars: Study Guide]. Zaporizhzhia: NU Zaporizka politekhnikha, 2021, 193 p. (in Ukrainian). ISBN 978-617-529-282-2

3.Shalapko, D. O., Prysunko, M. A., Rudenko, O. V., & Andrienko, H. O. (2018). Hibrydna sylova ustanovka vantazhnoho avtomobilia yak perspektyvnyi napriamok rozvytku haluzi [Hybrid power plant of a truck as a promising direction of industry development]. Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii v nautsi,

tekhntsi ta osviti: Zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii [Modeling and information technologies in science, technology and education: Collection of scientific papers of the International scientific and practical Internet conference]. Kharkiv: KhNADU, pp. 230-234 (in Ukrainian)

4.Haoran Hu, Simon J. Baseley, Xubin Song (2021) Advanced hybrid Powertrains Commercial vehicles.SAE International ISBN: 978-1-4686-0136-7

5.Karjalainen, P. Leinonen, V.; Olin, M.; Vesisenaho, K.; Marjanen, P.; Järvinen, A.; Simonen, P. Markkula, L.; Kuuluvainen, H.;Keskinen, J.; et al. (2024) Real-world emissions of nanoparticles, particulate mass and black carbon from a plug-in hybrid vehicle compared to conventional gasoline vehicles. Environ. Adv. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100454>

6.Yachao Wang, Yi Wen, Qinggong Zhu, Jiabin Luo, Zhengjun Yang, Sheng Su, Xin Wang, Lijun Hao, Jianwei Tan, Hang Yin, Yunshan Ge(2022) Real driving energy consumption and CO₂ & pollutant emission characteristics of a parallel plug-in hybrid electric vehicle under different propulsion modes. Energy Volume 244, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123076>.

7.Rong Huang, Jimin Ni, Teng Zheng, Qiwei Wang, Xiuyong Shi, Zhenxu Cheng (2022) Characterizing and assessing the fuel economy, particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes, Atmospheric Pollution Research, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101597>.

8.Roberta De Robbio, Maria Cristina Cameretti, Ezio Mancaruso, (2022) Investigation by modelling of a plug-in hybrid electric commercial vehicle with diesel engine on WLTC, Fuel, Volume 317, ISSN 0016-2361 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123519>

9.Feiyang Xu, Curran Crawford, Yanbiao Feng, Zhenhong Lin, Shunxi Li (2023) Environment-economic analysis of diesel, hybrid electric, plug-in hybrid electric trucks in China. Research Part D: Transport and Environment, Volume 117, ISSN 1361-9209 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103661>

M. Kondratiuk. Research of operation conditions for N1 category hybrid trucks.

At the intersection of several key trends—tightening environmental standards for vehicles, relentless urbanization, growing dependence on fuel imports, and the increasing role of light commercial vehicles in e-commerce logistics—the efficiency of the powertrain for N1 category vehicles becomes critically important. N1 category vehicles constitute a significant share of the vehicle fleet, and according to manufacturer data, they operate in urban driving modes for over 75% of their working time. The most suitable solution for this operating regime appears to be the hybrid powertrain, which has been developed over the last 20 years and is widely implemented in passenger transport. A significant lag in both scientific research and practical implementation of hybrid systems for this vehicle type has been identified. To address this gap, a practical study of the operating conditions of a popular commercial vehicle (Mercedes Sprinter 208 CDI, Euro 6) was conducted under real-world conditions during a typical working day. This provided an empirical basis for further mathematical modeling. Analysis of data from the on-board computer and an OBDII scanner identified specific features of the duty cycle, notably a significant proportion of coasting, accounting for 35% of the route (44.2 km). This confirms the potential for energy recuperation and the use of a hybrid powertrain in conditions with frequent stops. At this stage, a preliminary analysis of data collected from the on-board computer for 20 stops has been conducted. The obtained data were systematized into a tabular form, and graphs of speed and fuel consumption changes were plotted. Data collected via the OBDII scanner, including speed, acceleration, engine load, longitudinal road grade, and the impact of driving style, will be used for further, more detailed analysis. The obtained empirical data will form the basis for subsequent mathematical modeling. This will enable the development of optimal hybrid powertrain configurations, including the power split between the internal combustion engine and the electric motor, as well as the capacity of the traction battery. The research results will not only enhance fuel efficiency—increasing the competitiveness of transport companies by reducing the Total Cost of Ownership (TCO), as confirmed by recent international studies (e.g., TCO for HEV trucks is the lowest)—but will also contribute to reducing harmful emissions, particularly in urban cycles, thereby positively impacting the environmental situation, namely air quality.

КОНДРАТЮК Микола Анатолійович, аспірант другого року навчання кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: nikolaykondratyuk86@gmail.com

Mukola KONDRATIUK Second-year graduate student of the Department of Automobiles, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nikolaykondratyuk86@gmail.com

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1925

СУЧАСНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИМОГИ ДО ДОРОЖНІХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті розглянуто сучасні експлуатаційні вимоги до перспективних автомобілів — транспортних засобів, що проєктуються з урахуванням майбутніх технічних, екологічних і соціальних викликів. Аналіз охоплює аспекти безпеки, надійності, паливної й енергетичної ефективності, екологічності, технічного обслуговування, ергономіки, цифровізації та кібербезпеки, а також стандартизації і регуляторні вимоги. Наведено рекомендації щодо експлуатаційної політики та комплексного підходу до оцінки готовності автомобіля до сучасних умов експлуатації.

На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації щодо вдосконалення експлуатаційної політики, упровадження інтелектуальних систем управління технічним станом і забезпечення комплексного підходу до оцінки готовності автомобіля до експлуатації в сучасних умовах. Отримані результати можуть бути використані при розробленні нормативних документів, модернізації технічних систем, а також у наукових дослідженнях, спрямованих на підвищення ефективності та безпеки транспортних засобів майбутнього.

Ключові слова: перспективні автомобілі, експлуатаційні вимоги, надійність, безпека, енергоефективність, екологічність, технічне обслуговування, цифровізація, кібербезпека.

ВСТУП

Сучасний автомобіль перестав бути лише механічним засобом пересування. Він поєднує механіку, електроніку, програмне забезпечення та складні системи управління. Перспективні автомобілі — це транспортні засоби, які проєктуються з урахуванням тривалого життєвого циклу, змін у енергетичній інфраструктурі, суворіших екологічних норм та нових очікувань користувачів щодо комфорту й безпеки. Це ставить нові експлуатаційні вимоги, які повинні бути закладені ще на етапі розробки й підтверджені під час експлуатації.

Сучасний автомобіль перетворився на складну систему, що поєднує механічні, електронні, інформаційні та енергетичні компоненти. Перспективні автомобілі мають забезпечувати високу ефективність експлуатації, надійність, екологічність і цифрову інтеграцію з інфраструктурою. Зростання вимог до транспортних систем зумовлює необхідність формування нових експлуатаційних критеріїв, які враховують життєвий цикл, безпеку, енергоефективність і адаптивність автомобіля.

Мета статті — систематизувати та обґрунтувати сучасні вимоги до експлуатації перспективних автомобілів, виокремити ключові напрями вдосконалення експлуатаційної політики та запропонувати практичні рекомендації для виробників, операторів автопарків і сервісних організацій.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

У сучасних дослідженнях експлуатаційних характеристик автомобілів вітчизняні та зарубіжні автори розглядають широкий спектр проблем, пов'язаних з надійністю, безпекою, енергоефективністю та цифровізацією транспортних засобів. Проблеми підвищення експлуатаційної надійності та безпеки автомобілів активно досліджуються в роботах вітчизняних і зарубіжних учених. Зокрема, Мигаль В.Д. підкреслює важливість адаптації технічного обслуговування до нових технологій. Р.С. Сидоренко, В.А. Ануфрієв, В.О. Колесніков аналізують розвиток електронних систем керування, а Петров А. І. і Гончарук М. С. досліджують енергетичні аспекти електромобілів. Міжнародні стандарти ISO 26262 і SAE визначають принципи функціональної безпеки, а звіти Міжнародного енергетичного агентства (IEA) наголошують на важливості енергоефективності в автомобільному секторі.

Мигаль В.Д. (2022) приділяє особливу увагу організації технічного обслуговування автомобілів з урахуванням новітніх технологій, підкреслюючи необхідність впровадження систем телеметричного моніторингу та предикативного обслуговування для зниження простоїв і підвищення надійності експлуатації [1]. Р.С. Сидоренко, В.А. Ануфрієв, В.О. Колесніков (2023) аналізують сучасні системи керування автомобілем, зокрема впровадження ADAS та електронних систем безпеки. Вони підкреслюють, що активна безпека стає ключовим елементом експлуатаційної політики, і від правильності її налаштувань залежить не лише безпека пасажирів, а й ефективність роботи автомобіля в складних умовах [2]. Гандзюк М.О., Дубицький О.С., Мазилук П.В. (2024) Розглядають принципи формування математичної моделі багатокритеріальної структури оцінки якості автомобіля в системі управління терміном експлуатації автомобіля, що повинні відображати

основну сукупність сучасних вимог середовища його експлуатації та нівелювати недоліки моделей, які раніше застосовувалися. [3]. Л. І. Гречихін, Н. Г. Куць (2016) Досліджують переваги радіотехнічної діагностики автомобіля, які полягають в безконтактності, високій точності, швидкості обстеження, безпечності, універсальності, доступу до важкодоступних зон. При радіотехнічній діагностиці транспортного засобу немає потреби розбирати або дефектувати деталі автомобіля, а дозволяє виявляти дрібні дефекти або зміни на ранніх стадіях затрачаючи значно менше часу, ніж традиційна діагностика [4]. Novak J., Smith A. (2017) у своїй роботі «Vehicle Reliability and Maintenance Strategies» проводять порівняльний аналіз традиційних та предиктивних стратегій обслуговування автомобілів у різних країнах. Вони показують, що використання станоорієнтованого обслуговування дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування до 20–25% і підвищити безвідмовність систем. Haeusler A. (2021) у журналі Automotive Security Journal розглядає питання кібербезпеки автомобільних систем. Він вказує на необхідність багаторівневої автентифікації, шифрування даних, подій та регулярного аудиту безпеки для запобігання кібератакам. Система управління кібербезпекою (CSMS) відноситься до систематичного, заснованого на оцінці ризиків підходу до встановлення організаційних процесів, обов'язків і керівництва в управлінні ризиками, пов'язаними з кіберзагрозами для транспортних засобів, і захистом транспортних засобів від кібератак [5].

Регламент ООН № 155 - Єдині положення щодо офіційного затвердження транспортних засобів стосовно кібербезпеки та системи управління кібербезпекою [2021/387] [6]. Міжнародні стандарти ISO 26262 та документи SAE визначають принципи функціональної безпеки автомобілів, що стають обов'язковими для всіх виробників сучасних автомобілів і закладають основу для експлуатаційних процедур. Звіт Міжнародного енергетичного агентства (IEA) «Global EV Outlook» підкреслює глобальні тенденції розвитку електромобільного транспорту, зростання частки електромобілів у світовому автопарку та важливість розвитку зарядної інфраструктури. Це стимулює зміни в експлуатаційній політиці та вимогах до енергоефективності. Європейська комісія (Clean Vehicles Directive) визначає нормативні вимоги щодо екологічності автомобілів, обмеження викидів та процедури утилізації батарей і інших компонентів, що впливають на стандарти експлуатації перспективних автомобілів. Крихтіна Ю. О. аналізує державну політику розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика [7].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що ключові напрями розвитку експлуатаційних вимог до транспортних засобів включають:

- підвищення надійності через модульність і стандартизацію компонентів;
- впровадження цифрових технологій для предиктивного обслуговування;
- інтеграцію систем активної безпеки;
- оптимізацію енергоефективності та керування батареями;
- забезпечення кібербезпеки та захисту даних;
- дотримання міжнародних стандартів та екологічних норм.

Ці напрями визначають сучасну концепцію експлуатаційної політики перспективних автомобілів, формують вимоги до виробників, операторів автопарків та сервісних організацій та можуть служити науковою основою для подальших досліджень та розробок.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є систематизація сучасних експлуатаційних вимог до перспективних автомобілів і формування рекомендацій щодо вдосконалення експлуатаційної політики. Для забезпечення стійкої та ефективної експлуатації необхідні координація між виробником, оператором та сервісною мережею, а також постійне оновлення стандартів і навчання персоналу. Перспективні автомобілі мають бути спроектовані з метою спрощення технічного обслуговування: уніфіковані модулі, доступ до часто обслуговуваних деталей, застосування діагностичних інтерфейсів і це знижує час простою та вартість експлуатації.

Для досягнення мети вирішено такі завдання:

- визначити ключові напрями розвитку експлуатаційних характеристик;
- узагальнити тенденції цифровізації;
- оцінити вплив екологічних і кібербезпекових факторів на експлуатацію.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Узагальнення показало, що формування експлуатаційних вимог має базуватись на системному підході. Ключовими напрямками є інтеграція цифрових технологій у технічне обслуговування, підвищення надійності через модульність і діагностику, зниження впливу на довкілля, а також

забезпечення кіберзахисту. Розроблення стандартів експлуатації сприятиме ефективнішій адаптації автомобілів до умов майбутнього транспорту. Проведений аналіз сучасних експлуатаційних вимог до перспективних автомобілів дозволяє сформулювати наступні ключові результати:

1. Комплексність експлуатаційних вимог: сучасні транспортні засоби інтегрують механічні, електронні та програмні системи, що вимагає комплексного підходу до їхнього обслуговування. Виявлено, що ефективна експлуатація можлива лише за умови узгодження технічних, організаційних і екологічних аспектів.

2. Безпека та надійність: інтеграція пасивних та активних систем безпеки знижує ризики аварій та підвищує надійність автомобіля. Дослідження показують, що регулярне калібрування сенсорів та оновлення програмного забезпечення є критично важливими для підтримки працездатності.

Пасивна безпека передбачає комплекс конструктивних рішень, спрямованих на мінімізацію наслідків ДТП. До них належать енергопоглинальні зони деформації, каркас безпеки, системи подушок безпеки, ремені з переднатягувачами. Перспективні автомобілі проєктуються з використанням нових високоміцних легких матеріалів — алюмінієвих сплавів, композитів, термопластів. Це дає змогу знизити масу транспортного засобу без втрати жорсткості кузова. В експлуатації необхідно проводити регулярний огляд несучих елементів кузова, перевірку стану кріплень, шарнірів, швів і антикорозійного покриття. Такі процедури особливо актуальні для електромобілів, у яких батарейні блоки часто інтегровані у силову структуру шасі.

Системи активної безпеки (ABS, ESP, TCS, AEB, LKA, ACC тощо) [8] запобігають виникненню аварійних ситуацій. Для перспективних автомобілів обов'язковими стають комплекси ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) та системи автономного керування. Основні експлуатаційні вимоги полягають у:

- регулярному калібруванні сенсорів (LiDAR, радар, камери);
- оновленні програмного забезпечення систем розпізнавання та обробки даних;
- перевірці працездатності після кузовного ремонту або зміни геометрії кузова;
- періодичній перевірці точності системи позиціонування в складних умовах (дощ, сніг, пил).

Надійна робота цих систем безпосередньо впливає на експлуатаційну безпеку автомобіля.

3. Енергоефективність і паливно-енергетична політика: сучасні автомобілі використовують різні типи приводів (електричні, гібридні, водневі). Оптимізація роботи батарей, систем рекуперації енергії та управління заряджанням значно підвищує ресурс компонентів та зменшує експлуатаційні витрати. Використання модульної конструкції дозволяє зменшити вплив на навколишнє середовище через повторне використання деталей і переробку батарей.

Перспективні автомобілі використовують різні комбінації приводів: двигуни внутрішнього згоряння з системами рекуперації, паралельні або послідовні гібриди, повністю електричні приводи з літій-іонними або твердотільними батареями, водневі паливні елементи. Для кожного типу встановлюються свої експлуатаційні вимоги: контроль температури, графік заряджання, допустимі цикли глибокого розряду, правила зберігання при низьких температурах.

Система BMS (Battery Management System) відповідає за моніторинг напруги, температури та струму кожної комірки батареї. Вона здійснює балансування елементів, запобігає перегріву, короткому замиканню та деградації. Під час експлуатації потрібно регулярно перевіряти стан охолоджувальної системи батареї, контролювати журнали заряджання і цикли глибокого розряду, проводити діагностику деградації елементів через програмні інтерфейси, дотримуватися правил зберігання при тривалому простої автомобіля.

Експлуатаційна ефективність електромобіля залежить від доступності зарядних станцій і сумісності роз'ємів (Type 2, CCS, CHAdeMO тощо). Перспективні системи Smart Charging дозволяють балансувати навантаження на електромережу, знижувати вартість енергії та підтримувати енергетичну стабільність регіону. Для автопарків важливо інтегрувати зарядні станції у внутрішню систему управління транспортом.

4. Цифровізація та кібербезпека: впровадження телеметрії та віддаленого моніторингу дозволяє прогнозувати технічний стан автомобіля, запобігати поломкам та оптимізувати ресурси автопарків. Забезпечення кібербезпеки стає невід'ємною частиною експлуатаційної політики, що включає шифрування даних, аудит оновлень та контроль доступу.

Телеметричні системи (наприклад, On-Board Diagnostics 3.0, Over-the-Air Updates) дозволяють збирати дані про стан автомобіля в реальному часі. Ці дані використовуються для технічного моніторингу, аналізу стилю водіння та оптимізації маршрутів. Експлуатаційні вимоги включають: стандартизовані протоколи передачі даних, збереження критичних параметрів у локальному сховищі,

резервування каналів зв'язку у випадку збою мережі. Оскільки автомобіль стає частиною мережевої інфраструктури, він підлягає ризикам кібератак. Основними заходами є: перевірка цифрових підписів оновлень, шифрування телеметричних даних, багаторівнева автентифікація доступу до діагностичних систем, журналювання подій і періодичний аудит безпеки. Кібербезпека стає не менш важливою, ніж механічна надійність автомобіля.

5. Ергономіка та комфорт: адаптивні інтерфейси, підтримка користувачів з обмеженою мобільністю та інтуїтивно зрозумілі інформаційно-розважальні системи підвищують безпеку і зручність експлуатації. Перспективні автомобілі мають бути пристосовані до потреб різних груп користувачів. Інтерфейси керування стають адаптивними: налаштовуються під зріст, зір, уподобання водія. Використання технологій штучного інтелекту дає змогу прогнозувати наміри користувача й автоматично налаштовувати системи. Інформаційно-розважальні системи інтегрують навігацію, зв'язок і допомогу водієві. Вони повинні бути простими, інтуїтивними, не відволікати від керування. Вимоги експлуатації включають періодичні оновлення, перевірку функціональності голосового керування та контроль сумісності мобільних пристроїв.

6. Надійність і технічне обслуговування. Конструктивна ремонтпридатність показує, що перспективні автомобілі мають проектуватися за принципом Design for Maintenance, тобто з урахуванням зручності доступу до вузлів, уніфікації кріплень, модульності компонентів. Це скорочує тривалість простоїв та витрати на ремонт. Особливу увагу приділяють розробці єдиних діагностичних інтерфейсів (наприклад, OBD-III, UDS, DoIP), які дозволяють проводити дистанційне тестування систем і програмну реконфігурацію блоків.

При предикативному обслуговуванні традиційна система технічного обслуговування за календарем поступається місцем станорієнтованому (condition-based) та предиктивному підходам. Автомобіль самостійно збирає телеметричні дані з датчиків (вібрації, тиск, температура, струм) і передає їх у хмарні аналітичні системи. На основі алгоритмів машинного навчання прогнозується ресурс компонентів (наприклад, підшипників або батарейних модулів). Це дозволяє запобігати відмовам і зменшити непланові простої транспорту.

Для забезпечення безперервної експлуатації потрібна стандартизована логістична система постачання запасних частин. Важливими стають цифрові каталоги компонентів, уніфіковані коди деталей і можливість 3D-друку деяких елементів на місці. У разі оновлення електронних модулів (наприклад, блоків керування) необхідно забезпечити версійність програмного забезпечення, щоб уникнути конфліктів після ремонту.

7. Екологічність і вплив на довкілля. Навіть електромобілі мають непрямі викиди, пов'язані з виробництвом батарей і генерацією електроенергії. Тому при оцінці екологічності враховують повний життєвий цикл (LCA) — від виробництва матеріалів до утилізації. В експлуатації необхідно передбачати контроль викидів (для ДВЗ), утилізацію мастил, фільтрів і акумуляторів відповідно до європейських директив (ELV, REACH). Сучасні вимоги вимагають організації систем рекуперації матеріалів — особливо для акумуляторів, які містять літій, кобальт і нікель. Перспективним напрямом є ремануфактуринг (remanufacturing) — відновлення вживаних компонентів із подальшим поверненням у використання.

8. Роль міжнародних стандартів і нормативів: відповідність ISO 26262, SAE та директивам ЄС забезпечує єдині правила безпеки, екологічності та функціональної надійності, що спрощує експлуатацію в різних регіонах та підвищує довіру користувачів і операторів автопарків.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Пасивна безпека (конструктивні елементи кузова, зони деформації, системи утримання пасажирів) лишається базовим експлуатаційним вимогою. Для перспективних автомобілів важливо забезпечити високу корозійну стійкість матеріалів, збереження енергопоглинальних властивостей упродовж тривалого ресурсу та доступність елементів кріплення під час технічного обслуговування. Експлуатація має передбачати періодичну перевірку стану каркасу, антикорозійного покриття й кріпильних з'єднань.

Системи допомоги водієві (ADAS) і автоматичного керування зростають у складності й кількості. Експлуатаційні вимоги включають регулярне калібрування датчиків (радар, LiDAR, камери), оновлення програмного забезпечення та діагностику сенсорних систем. Оператори повинні мати процедури перевірки працездатності ADAS після ремонту чи зіткнення, а також під час зміни умов експлуатації (наприклад, інтенсивного снігу або пилу).

Експлуатаційні політики повинні передбачати логістику запасних частин, стандартизовані процедури ремонту модулів та можливість оновлення (replacement vs. repair). Прозора система

версійності електронних модулів і ПО знижує ризик несумісності після ремонту. Перехід від календарного до станоорієнтованого та предиктивного обслуговування підвищує ефективність. Необхідні вимоги: наявність систем моніторингу стану компонентів, збір телеметрії, стандартна процедура оновлення та аналізу даних для своєчасної діагностики.

Для електромобілів ключовими є вимоги до систем управління батареями (BMS): моніторинг стану, балансування елементів, захист від глибокого розряду та перегріву. Експлуатація передбачає регулярні перевірки стану батарей, ведення історії заряджання та температурного режиму, а також рекомендації щодо тривалого зберігання. Навіть електромобілі мають екологічні аспекти — виробництво, утилізація батарей і матеріалів. Експлуатаційні процедури мають включати відповідні правила утилізації, рекуперації та переробки компонентів, а також моніторинг життєвого циклу.

Перспективні автомобілі повинні враховувати різноманітність користувачів: адаптивні інтерфейси, підтримка людей з обмеженою мобільністю, простота управління та інтуїтивність систем інформаційно-розважального комплексу. Експлуатаційні вимоги мають включати налаштування профілів користувачів, документацію з чіткими інструкціями та навчання персоналу автопарків. Зі збільшенням ролі програмного забезпечення та мережевого зв'язку зростає ризик кібератак. Експлуатаційні вимоги повинні містити політики оновлень ПО, верифікації підписів оновлень, процедури відновлення після інцидентів та регулярні аудити безпеки. Перспективні автомобілі повинні бути спроектовані з урахуванням міжнародних і національних стандартів (конструктивні, екологічні, безпекові). Експлуатаційні вимоги включають підтримку сертифікаційних документів, наявність процедур для підтвердження відповідності після модифікацій та оновлень, а також ведення документації про технічний стан.

Практичні рекомендації:

1. Впровадити системи моніторингу стану збирання телеметрії для предикативного обслуговування.
2. Розробити регламенти калібрування і перевірки ADAS після будь-яких ремонтних робіт.
3. Впровадити процедурні вимоги до оновлень ПО — підписані пакети, журнал оновлень і відкатні плани.
4. Забезпечити логістику запасних частин та план заміни/ремонту батарей і модулів.
5. Організувати регулярне навчання персоналу та доступ до цифрової документації.

Розроблення методу та апаратури для аналізу й вимірювання інтегральної потужності при моніторингу транспортних засобів є складним, проте вкрай актуальним інженерним завданням, що охоплює питання електромагнітної сумісності (ЕМС), екологічної безпеки, кіберзахисту та радіомоніторингу. Основною метою такого дослідження є визначення інтегральної (сумарної) потужності шуму, який випромінюється транспортним засобом — незалежно від типу його силової установки (двигун внутрішнього згоряння, гібридна чи електрична система приводу). Аналіз проводиться у заданому діапазоні частот з урахуванням особливостей роботи двигуна, електрообладнання, систем заряджання (у випадку електромобілів) та комутаційних пристроїв — зокрема інверторів і систем широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Функціональні завдання дослідження передбачають виконання таких етапів:

- аналіз параметрів шуму транспортного засобу;
- побудову спектрограм випромінювань у заданому частотному діапазоні;
- автоматичне обчислення інтегральної потужності;
- порівняння отриманих результатів із нормативними вимогами.

Подальша оцінка результатів здійснюється шляхом побудови графіка зміни інтегральної потужності у часі. При проведенні аналізу застосовується нормативна база, що регламентує вимоги до електромагнітної сумісності транспортних засобів:

- CISPR 12, CISPR 25 — норми щодо рівнів радіоперешкод, що випромінюються транспортними засобами;
- ГОСТ 30377, ГОСТ Р 51317 — методики випробування електромагнітного випромінювання та оцінки його впливу;
- ISO 11452-1 — стандарти, що визначають імунітет автомобільних електронних систем до радіочастотного випромінювання.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу літератури, досліджень та практичних прикладів експлуатації перспективних автомобілів можна зробити такі висновки:

1. Інтеграція технологій: перспективний автомобіль — це система, де механічні, електронні та цифрові компоненти повинні працювати синхронно. Експлуатаційна політика має забезпечити їхню сумісність та надійність протягом усього життєвого циклу.

2. Пріоритет безпеки та надійності: поєднання пасивної та активної безпеки, регулярне технічне обслуговування та калібрування сенсорів є критичними факторами зменшення аварійності та підвищення довговічності автомобіля.

3. Енергоефективність та стійкість: ефективне управління енергетичними ресурсами, передбачення деградації батарей та використання гібридних і електричних приводів зменшує експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище.

4. Цифровізація та кібербезпека: впровадження телеметрії, систем віддаленого обслуговування та захисту даних дозволяє переходити від традиційного календарного обслуговування до станорієнтованого і предикативного, що підвищує ефективність і безпеку.

5. Модульність та стандартизація: застосування уніфікованих модулів, стандартних інтерфейсів та відповідність міжнародним нормам забезпечує швидкий ремонт, повторне використання компонентів і легке впровадження нових технологій.

6. Рекомендації для практики: впроваджувати системи моніторингу стану і предикативного обслуговування, організувати регулярне навчання персоналу та доступ до цифрової документації, забезпечити логістику запасних частин та план заміни батарей і модулів, створювати регламенти калібрування ADAS і перевірки працездатності систем безпеки після ремонтів.

Таким чином, успішна експлуатація перспективних автомобілів можлива лише за умови комплексного підходу до безпеки, надійності, енергоефективності, цифровізації та дотримання міжнародних стандартів, що забезпечує стійку, ефективну та екологічно відповідальну експлуатацію.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. В.Д. Мигаль, Інтелектуальне діагностування транспортних засобів [Текст] / В. Д. Мигаль, Щ. В. Аргун, А. В. Гнатов, П. Сохін // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. - 2022. - № 22. - С. 15-23. XVI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (с. 317-319). Вінниця. ISBN 978-966-641-950-0.

2. Р.С. Сидоренко, В.А. Ануфрієв, В.О. Колесніков. Нові технології в галузі автомобільного водневого транспорту. XVI Міжнар. наук-практ. конф. «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», Матеріали 23-25 жовтня 2023 року, Вінниця. 2023. С. 317-319. ISBN 978-966-641-950-0.

3. Гандзюк М.О.(2024) Розробк математичної моделі багатокритеріальної структури оцінки показників якості автомобіля // Гандзюк М.О., Дубицький О.С., Мазилук П.В. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, ЛНТУ - 2024, №1 (22)С. 130-136

4. Гречихін Л. І. (2016) Радіотехнічна діагностика транспортних систем / Л. І. Гречихін, Н. Г. Куць // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 55. - С. 87-89. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18

5. UN Regulation No 155 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to cybersecurity and cybersecurity management system [2021/387]. 6. SAE International. Electric vehicle testing and battery management standards.

6. Європейська комісія. Clean Vehicles Directive — офіційні документи ЄС. Режим доступу -- <http://www.unecsc.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>

7. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика : монографія. Харків: «Діса плюс», 2022. – 336 с.

8. Режим доступу -- <https://avtoshkola.dp.ua/uk/suchasni-systemy-bezpeky-avtomobilia/>

REFERENCES

1. Myhal, V. D., Arhun, Sh. V., Hnatov, A. V., & Sokhin, P. (2022). *Intelektualne diahnostuvannia transportnykh zasobiv* [Intelligent diagnostics of vehicles]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii*, (22), 15–23. *the XVI International Scientific and Practical Conference “Modern Technologies and Prospects for the Development of Motor Transport”* (pp. 317–319). Vinnytsia. ISBN 978-966-641-950-0.

2. Handziuk, M. O., Dubytskyi, O. S., & Mazyliuk, P. V. (2024). *Rozrobka matematychnoi modeli bahatokryterialnoi struktury otsinky pokaznykiv yakosti avtomobilia* [Development of a mathematical model of a multicriteria structure for evaluating vehicle quality indicators]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti (LNTU)*, 1(22), 130–136.

3. Hrechykhin, L. I., & Kuts, N. H. (2016). *Radiotekhnichna diahnostyka transportnykh system* [Radio engineering diagnostics of transport systems]. *Naukovi notatky*, (55), 87–89. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18
4. United Nations Economic Commission for Europe. (2021). *UN Regulation No. 155 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to cybersecurity and cybersecurity management system (2021/387)*.
5. SAE International. (n.d.). *Electric vehicle testing and battery management standards*.
6. European Commission. (n.d.). *Clean Vehicles Directive – Official EU documents*. Retrieved from <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>
7. Krykhtina, Yu. O. (2022). *Derzhavna polityka rozvytku transportnoi haluzi Ukrainy: teoriia, metodolohiia, praktyka* [State policy for the development of the transport sector of Ukraine: theory, methodology, practice]. Kharkiv: Disa Plyus.
8. *Suchasni systemy bezpeky avtomobilia* [Modern automotive safety systems]. (n.d.). Retrieved from <https://avtoshkola.dp.ua/uk/suchasni-systemy-bezpeky-avtomobilia/>

Kuts N.G. Contemporary Operational Requirements for Road Vehicles

This paper examines modern operational requirements for prospective vehicles — transportation means designed with consideration of future technical, ecological, and social challenges. The study provides a comprehensive analysis of key aspects, including vehicle reliability, safety, fuel and energy efficiency, environmental impact, maintenance strategies, ergonomics, digitalization, cybersecurity, standardization, and regulatory compliance. Emphasis is placed on the integration of active and passive safety systems, predictive maintenance strategies, advanced battery management, and sustainable energy management approaches.

The review highlights recent scientific and industrial research, identifies current trends in automotive technologies, and provides practical recommendations for vehicle manufacturers, fleet operators, and service organizations. The paper stresses the importance of life-cycle management, modular design, and digital monitoring systems to ensure reliable, efficient, and environmentally responsible operation.

Finally, the study underscores that the development and implementation of a comprehensive operational policy, aligned with international standards and emerging technologies, is crucial to maintaining vehicle safety, performance, and sustainability in the evolving transportation landscape.

Developing a method and equipment for analyzing and measuring integral power when monitoring vehicles is a complex but extremely relevant engineering task that covers issues of electromagnetic compatibility (EMC), environmental safety, cyber security, and radio monitoring. The main goal of this research is to determine the integral (total) power of noise emitted by a vehicle, regardless of the type of its power plant (internal combustion engine, hybrid or electric drive system). The analysis is carried out in a specified frequency range, taking into account the characteristics of the engine, electrical equipment, charging systems (in the case of electric vehicles), and switching devices, in particular inverters and pulse width modulation (PWM) systems.

Keywords: prospective vehicles, operational requirements, reliability, safety, energy efficiency, environmental sustainability, maintenance, cybersecurity, digitalization.

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 KUTS, PhD in Engineering, 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: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1926

Любий Є.В., Горбачов П.Ф., Капінус С.В., Губарєв О.С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАНУ КООРДИНАЦІЇ

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення ефективності систем координованого керування дорожнім рухом у містах за рахунок врахування часу випередження, необхідний для розгону додаткових транспортних засобів, що накопичуються перед стоп-лінією чергового в плані координації перехрестя. На відміну від закордонних практик впровадження адаптивних систем керування транспортними потоками, в українських умовах через фінансові та інфраструктурні обмеження основним інструментом ефективного керування рухом транспорту у містах залишається саме координована робота світлофорних об'єктів (зелена хвиля). Наявні методики побудови планів координації не враховують впливу додаткових транспортних засобів, що з'являються на підходах до скоординованих перехресть, а також часу, необхідного для розгону черги до швидкості руху основного потоку. Це знижує загальну ефективність координації та унеможливує забезпечення рівномірного просування транспортних засобів уздовж магістралі з координованим керуванням. Питання визначення і врахування часу випередження залишається відкритим, попри численні спроби оптимізації стрічки часу зеленої хвилі та гармонізації швидкості руху транспортних потоків. Для експериментального оцінювання впливу часу випередження на ефективність плану координації створено імітаційну транспортну модель ділянки магістралі з координованим керуванням (на основі прикладу з HCM 2016) у середовищі VISSIM. Змінним параметром у моделі є час випередження. Результати моделювання засвідчують, що середній час поїздки уздовж магістралі зменшується зі збільшенням часу випередження до 6 секунд, проте подальше його зростання призводить до різкого погіршення умов руху на другорядних напрямках. Отримані результати свідчать, що врахування часу випередження у плані координації здатне покращити умови руху основних транспортних потоків у зеленій хвилі, проте потребує одночасного моніторингу транспортного навантаження на другорядних напрямках.

Ключові слова: керування дорожнім рухом, план координації, регульовані перехрестя, транспортне моделювання, час випередження, VISSIM.

ВСТУП

Найбільш поширеною світовою практикою ефективного керування дорожнім рухом (КДР) у містах є використання адаптивних систем керування транспортними потоками (ТП), які в режимі реального часу аналізують трафік і автоматично змінюють режими роботи світлофорних об'єктів. Застосування таких систем дозволяє фахівцям з організації дорожнього руху оперативно вирішувати конфліктні ситуації, що можуть виникати в процесі руху ТП у межах міських територій, а також отримувати оптимальні параметри світлофорного регулювання з прив'язкою до відповідного часу доби, дня тижня та/або рівня навантаження рухом ділянок вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Адаптивні системи керування ТП ефективно працюють у багатьох закордонних містах де існує належне фінансування, сучасна транспортна інфраструктура, високошвидкісні канали зв'язку та достатня технічна підтримка.

На відміну від цього, в українських містах адаптивні системи керування ТП застосовуються поодинокі, що зумовлено обмеженими бюджетами, технологічною недосконалістю транспортних мереж, слабкою комунікаційною інфраструктурою, особливо в периферійних районах міських територій. У результаті цього основним інструментом ефективного КДР на елементах міської ВДМ залишаються координовані системи керування світлофорними об'єктами, які, здебільшого, створені без належного обґрунтування основних параметрів – часу циклу, зсувів, тривалості фаз, що відкриває значні резерви для удосконалення методів побудови планів координації (ПК) або іншими словами, зеленої хвилі (ЗХ), та, відповідно, підвищення ефективності КДР в містах.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вивченню проблематики побудови нових і удосконалення існуючих методів побудови ПК на міських магістралях присвячено велику кількість наукових і практичних робіт [1-3], у переважній більшості з яких, для визначення параметрів світлофорного регулювання у системах з координованим керуванням використовується формула Вебстера, яка має певні обмеження при її застосуванні на об'єктах із високим рівнем транспортного навантаження. До того ж у сучасній практиці використання координованих систем керування світлофорними об'єктами на міських магістралях при визначенні параметрів їх роботи не враховуються додаткові транспортні засоби (ТЗ), які можуть з'являтися з другорядних напрямків по відношенню до руху основного потоку ТЗ у ЗХ та/або ж є

розворотними ТЗ і накопичуються перед стоп-лінією координованого світлофорного об'єкту, не повною мірою формалізована взаємодія додаткових ТЗ з пачкою ТЗ ЗХ, а також невирішеною залишається проблематика гармонізації швидкості руху пачки ТЗ ЗХ координованою ділянкою міської ВДМ [3-5].

Проблему підтримання рівномірного руху ТЗ уздовж ділянки магістралі з координованим керуванням почали досліджувати досить давно [6] із посиланням на ще раніше опубліковані матеріали [7]. Основні дослідницькі зусилля щодо забезпечення рівномірного руху ТП були зосереджені на модифікації методів, заснованих на максимізації ширини стрічки часу ЗХ і розроблених для врахування впливу черг перед перехрестями на просування пачок ТЗ ЗХ. При розробці MULTIBAND, авторами [8] і [9], окрім можливості змінювати ширину стрічки часу ЗХ в залежності від інтенсивності руху ТП на окремих ділянках, передбачено також врахування параметру часу розсіювання черги. Водночас автори не наводять кількісної оцінки цього параметра, очевидно через складність представлення випадкового процесу розсіювання черги ТЗ одним конкретним значенням параметра. Проте можливість задання цього параметра в MULTIBAND підкреслює його важливість для координації та актуальність отримання обґрунтованих кількісних оцінок для нього.

Актуальність цього питання також підтверджується дослідженням [10], де представлено можливість програми PASSER II-84, яка обчислює ймовірність розсіювання черги на підходах до перехресть. Подібні функції має програма TRANSYT [11], яка дозволяє оцінювати довжину черги на основі моделі руху ТП. Таким чином, спільною рисою базових програмних продуктів для координації світлофорного регулювання з фіксованим циклом на магістралях є можливість врахування черг перед перехрестями під час розробки ПК та відсутність конкретних значень керівного параметра для управління цими чергами.

Автори [12] поставили перед собою завдання розширити можливість для руху ТЗ магістраллю з бажаною швидкістю без зупинок. Вони розробили програму BANDTOP, що реалізує їхній власний алгоритм, який максимізує ширину стрічки часу ЗХ за допомогою змішаного цілочислового програмування. На кожному перехресті вони поділили час між початком сигналу світлофора, що дозволяє рух, та початком стрічки часу ЗХ на дві частини: одна частина призначалася для розсіювання черг ТЗ, що здійснюють поворот, а інша – для пропуску ТЗ, що рухаються прямо, які не встигли перетнути перехрестя під кінець попереднього сигналу світлофора, що дозволяє рух. Автори зазначають, що їхня програма автоматично розраховує ці часові інтервали, але не надають значень параметру часу розсіювання черги. Результати роботи BANDTOP порівнювалися з результатами роботи MAXBAND та PASSER-II із використанням TRANSYT і NETSIM. Виявилося, що BANDTOP забезпечував скорочення часу поїздки та зменшення кількості зупинок, однак, подальшого застосування ця програма не набула. Для оптимізації ширини стрічки часу ЗХ при безперервному русі уздовж магістралі з координованим керуванням автори [13] розробили нову модель змішаного нелінійного цілочислового програмування з метою забезпечення проходження ТЗ максимальної кількості наступних перехресть без зупинок. У цій моделі вони запропонували метод розрахунку часу розсіювання черги шляхом введення параметрів інтенсивності прибуття ТЗ на під'їздах головного та другорядного напрямків. Однак у реальних умовах ці інтенсивності важко оцінити однозначно. Більше того, метод, описаний у [13], ґрунтується на припущенні, що інтенсивності прибуття ТЗ є відомими. Автори [14] стверджують, що на початку зеленого сигналу світлофору швидкість розсіювання черги може бути наближеною до швидкості потоку насичення. По суті, вони розглядають час розсіювання черги як добуток кількості ТЗ у черзі на інтервал насиченого руху. Це може наблизити просування пачки ЗХ до руху без зупинок, але не гарантує проїзду через перехрестя без уповільнень.

Дослідження [15] розглядає проблему максимізації ширини стрічки часу ЗХ для обох напрямків уздовж магістралі з урахуванням різних обсягів лівоповоротного руху, що робить його актуальним для теми забезпечення рівномірного руху ТП за умов координованого керування. Автори дослідження розробили ПК як для обох напрямків руху ТЗ по магістралі, так і для лівоповоротного руху з другорядних вулиць, що виходять на магістраль. Їхній основний метод проєктування двосторонньої ЗХ зі змінною шириною стрічки часу ЗХ передбачає переназначення ліній ЗХ для врахування часу розсіювання черги. Розроблений ПК є корисним у випадках інтенсивного лівоповоротного руху, що виходить на магістраль з координованим керуванням, і дозволяє розвантажити принаймні частину черги, проте не гарантує просування пачки ЗХ з постійною швидкістю.

Для проєктування ПК на магістралях з інтенсивним поворотним рухом і обмеженнями щодо

відстані між перехрестями автори [16] запропонували моделі, які засновуються на логіці MAXBAND. Ці моделі спрямовані на зменшення загальних затримок шляхом визначення відповідних часток тривалості дозвільного сигналу світлофору, збереження ширини стрічки часу ЗХ та запобігання відтоку ТЗ з лівоповоротних смуг, що може блокувати прямий рух. Запропонований підхід суттєво покращує результати планування координації з використанням MAXBAND. Черга на перехресті розглядається не стільки як причина зниження швидкості просування пачки ТЗ ЗХ, скільки як джерело додаткових затримок, що є актуальним у рамках даного дослідження.

У 2021 році автори [1] намагалися розробити ПК таким чином, щоб пачка ТЗ ЗХ не знижувала швидкість при проходженні наступних у ПК перехресть. Для того, щоб розігнати ТЗ з черги до швидкості руху пачки ТЗ ЗХ окрім врахування часу розсіювання черги (2 секунди на ТЗ) було подовжено на 4 секунди тривалість дозвільного сигналу світлофору для основних напрямків руху ТЗ. Цього часу виявилось недостатньо, щоб пачка ТЗ ЗХ мала змогу просуватися через перехрестя без помітного зниження швидкості. Було встановлено, що для уникнення значного зниження швидкості за розробленим ПК ТЗ у пачці ЗХ повинні рухатися зі швидкістю близько 40 км/год замість обраної швидкості руху ЗХ 50 км/год [1], що зменшує ефективність координації. Це вказує на необхідність оцінки часу випередження необхідного для розгону ТЗ, які стоять перед черговим в координації перехрестям, до швидкості руху ЗХ.

Ще один підхід щодо забезпечення рівномірного просування пачок ТЗ ЗХ полягає у впровадженні алгоритмів формування пачок. Ці алгоритми спрямовані на організацію ТЗ у пачки та адаптацію їхньої швидкості для прибуття на наступне скоординоване перехрестя на високій швидкості і проходження його якомога швидше за конкретних транспортних умов [17]. Такі алгоритми є перспективними, проте обмеження полягає в тому, що вони працюють із автономними ТЗ, і немає чітких рекомендацій щодо їх застосування для управління ТП, що складається зі звичайних ТЗ. Крім того, необхідні додаткові дослідження для інтеграції цих алгоритмів у методи координації світлофорів.

Інший підхід до забезпечення більш рівномірного руху ТЗ ЗХ представлено в роботі [18], де запропоновано використання моделі коефіцієнтів коригування для врахування впливу на ТП на наступних в ПК перехрестях. Цей вплив залежить від довжини наступної в ПК ділянки між світлофорами, довжини черги, параметрів роботи світлофорів та інтенсивності руху ТЗ. Результати експериментальних досліджень дозволили авторами дійти висновку, що за рахунок коригування зсувів можна ефективно впоратися з впливом наступних ділянок у ПК шляхом своєчасного розвантаження черг. Водночас авторами зазначається, що необхідно подальше вдосконалення моделей коефіцієнтів коригування шляхом додаткового детального аналізу реальних даних і врахування поведінки водіїв під час розвантаження черг.

Аналіз методів, спрямованих на забезпечення рівномірного руху ТЗ на скоординованих магістралях, свідчить, що питання забезпечення просування пачок ТЗ ЗХ із постійною обраною швидкістю досі залишається не до кінця вирішеним. Однією з причин цього є недостатнє уявлення про час випередження, необхідний для розгону ТЗ, які стоять у черзі на чергових перехрестях у ПК, до швидкості руху ТЗ ЗХ, що робить актуальним проведення даного дослідження.

У свою чергу, в роботі [5] частиною авторського колективу даної статті формалізовано процес взаємодії пачки ЗХ з додатковими ТЗ, а також розроблено методику оцінювання часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки ТЗ на ділянці міської магістралі з координованим керуванням. За результатами проведеного дослідження отримано нижню оцінку часу випередження за умов наявності одного додаткового ТЗ перед стоп-лінією чергового перехрестя в ПК. Отримані в [5] аналітичні моделі були експериментально перевірені у статтях [4, 19]. Найбільшу придатність показала модель, заснована на врахуванні лінійно спадаючого характеру прискорення ТЗ, про що свідчать результати кількісного і якісного оцінювання точності розрахунку часу випередження з використанням імітаційної транспортної моделі побудованої у VISSIM.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної статті є проведення експериментального оцінювання впливу часу випередження включення дозвільного сигналу світлофору на ефективність ПК. Основним інструментом досягнення мети дослідження є імітаційна транспортна модель ділянки міської магістралі з координованим керуванням, з використанням якої можна оцінити ефективність як базового, так і пропонованого варіантів координації, відповідно, без урахування часу випередження та з його врахуванням.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним завданням експерименту є демонстрація впливу величини часу випередження, за рахунок якого коригуються зсуви включення дозвільного сигналу світлофора на наступному в ПК перехресті і дозвільного сигналу світлофору для основного і другорядного напрямків руху ТЗ, на час поїздки ТЗ ділянкою міської магістралі з координованим керуванням. Для оцінювання цього впливу доцільно використовувати час поїздки як для ТЗ, що рухаються ділянкою магістралі з координованим керуванням в обох напрямках ЗХ, так і ТЗ, що перетинають магістраль з другорядних напрямків, оскільки час поїздки для відомого маршруту є інтегральним параметром, який об'єктивно відображає якість транспортного обслуговування, що відчують водії, а також вплив часу випередження на конкуруючі ТП.

Результати імітаційного експерименту, значною мірою, визначаються об'єктом моделювання та, особливо, реалізованим ПК. Отже, для забезпечення об'єктивності результатів моделювання доцільно вибрати об'єкт, вільний від впливу індивідуальної точки зору моделювальника. З цією метою прийнято рішення змодельовати рух на магістралі з координованим керуванням відповідно до випадку, представленого на сторінках 36–49 розділу 29 HCM 2016 «Urban Street Facilities Supplemental» [20]. Це відомий приклад ділянки магістралі з координованим керуванням з п'ятьма перехрестями, використання якого дозволяє оцінити вплив часу випередження. У цьому прикладі основні напрямки руху ТП – Схід і Захід, а другорядні – Північ і Південь.

Рух ТП уздовж магістралі з координованим керуванням було змодельовано за допомогою програмного забезпечення VISSIM Corridor 2025. Транспортна модель включає параметри світлофорного регулювання та інтенсивність руху ТЗ на всіх перехрестях. Проектна швидкість у ПК, представленому в розділі 29 HCM 2016, становила 40 миль/год (64,36 км/год), тому нижня і верхня межі швидкості ТЗ у моделі були встановлені на рівні 60 км/год та 70 км/год, відповідно.

Змінним параметром в імітаційній моделі є час випередження. За проектної швидкості, визначеної у випадку HCM 2016 [20], час випередження, необхідний для руху пачки ТЗ ЗХ з постійною швидкістю, за умови, що перед стоп-лінією наступного в ПК перехрестя стоїть один ТЗ, повинен становити від 9 до 10 секунд, залежно від безпечного інтервалу [5, 19]. Значення часу випередження збільшує тривалість дозвільного сигналу світлофору для основних напрямків руху ТП на всіх перехрестях і зменшує тривалість дозвільного сигналу світлофору для другорядних напрямків. Також за рахунок урахування часу випередження коригуються зсуви включення дозвільного сигналу світлофору на всіх перехрестях у ПК, крім першого у відповідному напрямку руху ЗХ

$$t_{3Ci}^* = t_{3Ci} - t_{CB} \cdot i, \quad (1)$$

де t_{3Ci}^* – скоригований зсув на i -му перехресті в ПК, с; t_{3Ci} – існуючий зсув на i -му перехресті в ПК, с; t_{CB} – час випередження, на який коригується зсув, с; i – номер перехрестя у ПК.

Розглянемо приклад коригування зсувів для напрямку руху ЗХ Захід – Схід за значення часу випередження 2 секунди, існуючі та скориговані значення зсувів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Інформація про величину існуючих і скоригованих зсувів включення дозвільного сигналу світлофора на черговому в ПК перехресті

Номер перехрестя в ПК	1	2	3	4	5
Номер перехрестя для коригування зсуву	0	1	2	3	4
Існуючий зсув, с	-	30	76	30	0
Скоригований зсув, с	-	28	72	24	72

Зміни у зсувах, спричинені врахуванням часу випередження, змінюють схему прибуття пачок ТЗ ЗХ і зумовлюють необхідність перепроєктування ПК. Однак повне перепроєктування призведе до втрати об'єктивності результатів моделювання не тільки через значний вплив вибору методу розрахунку параметрів ПК, але й через зміну спочатку запланованого часу проходження пачки ТЗ ЗХ між перехрестями. За таких умов доцільно відтворити початковий час прибуття пачки ТЗ ЗХ на кожне перехрестя. Це можливо завдяки вибору такої тривалості часу циклу, яка зберігає початково оцінений зсув для останнього перехрестя в координації та дозволяє показати прямий вплив часу випередження на середній час поїздки ТЗ ділянкою магістралі з координованим керуванням.

При проведенні моделювання час випередження варіювався у межах від 0 до 10 секунд з кроком у 2 секунди. Для кожного значення часу випередження проведено по 10 імітацій із

випадковими початковими числами від 1 до 10 з кроком зміни в 1. Результати імітацій розробленої транспортної моделі у VISSIM Corridor 2025 стали основою для розрахунку середнього часу поїздки ділянкою магістралі з координованим керуванням. У всіх імітаціях контрольні точки для вимірювання часу поїздки ТЗ були розміщені на кінцях модельованої ділянки магістралі: відстань між західною і східною контрольними точками становила 2500 м; відстань між північною і південною контрольними точками – 334 м. Час поїздки ТЗ з другорядних напрямків, що перетинають магістраль з координованим керуванням, було усереднено по всіх перехрестях. Результати моделювання наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Час поїздки ТЗ по головному напрямку та ТЗ з другорядних напрямків

Час випередження, с	Середній час поїздки, с					
	ТЗ, що рухаються головним напрямком			ТЗ, що перетинають головний напрямок з другорядних		
	Схід-Захід	Захід-Схід	Середнє	Південь-Північ	Північ-Південь	Середнє
0	171,4	172,3	171,9	40,2	40,7	40,5
2	163,1	165,5	164,3	40,9	41,1	41,0
4	156,5	159,9	158,2	42,1	42,8	42,5
6	152,3	156,3	154,3	43,5	44,6	44,1
8	151,7	158,0	154,9	66,6	79,6	73,1
10	157,1	154,8	156,0	119,8	130,6	125,2

Результати експерименту підтверджують скорочення часу поїздки пачки ТЗ ЗХ зі збільшенням часу випередження, хоча позитивний вплив на головний напрям руху ТП спостерігався до значення часу випередження у 6 секунд, що менше, ніж раніше отримані його оцінки [5, 19]. Причина цього полягає в параметрах обраного прикладу ПК [20], які були розраховані без урахування часу випередження. Таким чином, середній час поїздки ТЗ уздовж ділянки магістралі з координованим керуванням без затримок, 151,1 секунди, не був досягнутий у жодній з імітацій. Отже, постійна швидкість просування ТЗ у ЗХ може бути забезпечена лише в тому випадку, якщо час випередження враховується при розрахунку параметрів світлофорного регулювання у ПК.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Включення часу випередження в час циклу, як і очікувалося, збільшує час поїздки ТЗ при русі з другорядних напрямків. Це спричинено збільшенням рівня навантаження, який, як виявилось, подвоївся за максимального розглянутого значення часу випередження. До шестисекундного значення часу випередження збільшення часу поїздки ТЗ, що перетинають магістраль з другорядних напрямків, було прийнятним, оскільки рівень навантаження не наближався до критичного рівня 0,9. Тому прагнення до підтримання постійної швидкості руху пачки ТЗ ЗХ повинно супроводжуватися постійним моніторингом попиту на під'їздах до магістралі з боку другорядних напрямків.

ВИСНОВКИ

Існуючі методи координації світлофорних об'єктів не гарантують рівномірного руху пачок ТЗ ЗХ, особливо за наявності додаткових ТЗ. Недостатнє врахування часу випередження призводить до уповільнення ТЗ, зниження загальної ефективності координації та збільшення часу поїздки. Існуючі моделі та програмні продукти побудови ПК частково враховують черги ТЗ, проте не містять точних значень параметру часу їх розсіювання.

Результати імітаційного експерименту свідчать, що врахування часу випередження при розрахунку параметрів світлофорного регулювання в ПК, суттєво впливає на зростання кількості затримок і зупинок ТЗ і, відповідно, часу поїздки ТЗ, що перетинають магістраль з координованим керуванням з другорядних напрямків. Для пошуку оптимальних значень тривалості часу циклу, фаз і часу початку зсувів на чергових у ПК перехрестях необхідне обов'язкове врахування часу випередження, величину якого слід визначати з урахуванням існуючих умов і особливостей руху ТП у межах ділянки ВДМ з координованим керуванням, а також з урахуванням постійного контролю навантаження на перехрестя з боку другорядних напрямків.

Для скорочення часу поїздки ТЗ магістралями з координованим керуванням необхідно враховувати взаємодію пачок ЗХ з додатковими ТЗ, впроваджувати алгоритми формування пачок і коригування швидкості руху для забезпечення проходження наступних у координації перехресть без

уповільнення та зупинок. Хоча такі алгоритми й перспективні, їхня інтеграція в методи координації роботи світлофорів потребує додаткових досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Horbachov, P., Liubyi, Ye., Svichynskiy, S., Muzylyov, D., Ivanov, V. A comprehensive assessment of arterial signal coordination through a case study. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2025. 29. 101321. ISSN 2590-1982. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101321>.
2. Шевченко В.В. Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях : дис. на здоб. наук. ступ. докт. філософії : спец. 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті). Харків: ХНАДУ, 2023. 224 с.
3. Любий Є.В. Аналіз методів формування планів координації світлофорних об'єктів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. 2(19). С. 108–122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
4. Liubyi, Y., Horbachov, P., Kovtsur, K., Muzylyov, D., Ivanov, V. Simulation of the advance time of permissive traffic signal activation following the coordination plan on arterials: plan of the experiment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025, 126. P. 117–128. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.126.7>.
5. Любий Є.В., Горбачов П.Ф. Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. 22. С. 81–91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>.
6. Inose, H., Hamada, T. Road traffic control. University of Tokyo Press, Tokyo. 1975.
7. Stein, W. Traffic flow math pre-signals and the signal funnel. Theory of traffic flow, in: *Proceeding of the 1st International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1961. pp. 28–56.
8. Stamatiadis, C., Gartner, N.H. MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1996. 1554(1). P. 9–17. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400102>.
9. Gartner, N.H., Assman, S.F., Lasaga, F. Hou, D.L. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991. 25(1). P. 55–74.
10. Chang, E.C.P., Messer, C.J., Marsden B.G. Reduced-Delay Optimization and Other Enhancements in the PASSER 11-84. *Transportation Research Record*, 1985. 1005. P. 80–89.
11. Robertson, D.I. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, 1986. 56. P. 36–40.
12. Tsay, H.S., Lin, L.T. New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1988. 1194. P. 15–30.
13. Lin, L.-T., Tung, L.-W., Ku, H.-C. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 2009. 136(8). P. 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000123).
14. Ye, B. L., Wu, W., Mao, W.A. Two-way Arterial Signal Coordination Method with Queueing Process Considered. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015. 16(6). P. 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2461493>.
15. Chen, C., Chen, X., Huang, W., Li, K. A Two-Way Progression Model for Arterial Signal Coordination Considering Side-Street Turning Traffic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2019. 7(1). P. 1627–1650. <https://doi.org/10.1080/21680566.2019.1672590>.
16. Chen, Y.-H., Cheng, Y., Chang, G.-L. Incorporating Delay Minimization in Design of the Optimized Arterial Signal Progression. *Transportation Research Record*, 2022. 2676(4). P. 649–668. <https://doi.org/10.1177/03611981211064281>.
17. Timmerman, R.W., Boon, M.A.A. Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021. 17(3). P. 278–307. <https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1692962>.
18. Zhu, H., Nakamura, H. Modelling discharge flows at signalised intersections with adjustment of downstream effects. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022. 18(3). P. 736–761. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1895360>.
19. Горбачов П.Ф., Макарічев О.В., Любий Є.В. Імітаційне моделювання часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора в плані координації на міських магістралях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. 3. С. 112–124. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-112-124>.

20. TRB. Highway Capacity Manual. National Research Council, Washington. 2016.

REFERENCES

1. Horbachov, P., Liubiyi, Ye., Svichynskiyi, S., Muzylyov, D., & Ivanov, V. (2025). A comprehensive assessment of arterial signal coordination through a case study. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 29, 101321. ISSN 2590-1982. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101321>.
2. Shevchenko, V.V. (2023). Determination of rational parameters of progressive traffic control on urban highways [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. KhNAHU.
3. Liubiyi, Ye.V. (2022). Analysis of methods for forming traffic signal coordinated timing plans. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 2(19), 108–122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
4. Liubiyi, Y., Horbachov, P., Kovtsur, K., Muzylyov, D., & Ivanov, V. (2025). Simulation of the advance time of permissive traffic signal activation following the coordination plan on arterials: plan of the experiment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 126, 117–128. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.126.7>.
5. Horbachov, P.F., & Liubiyi, Ye.V. (2022). Method of estimating the time required to ensure the uniform motion of vehicle platoon progression on the coordinated section of the city arterial road. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*, 22, 81–91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>.
6. Inose, H., & Hamada, T. (1975). Road traffic control. University of Tokyo Press, Tokyo.
7. Stein, W. (1961). Traffic flow math pre-signals and the signal funnel. Theory of traffic flow, in: *Proceeding of the 1st International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, (pp. 28–56).
8. Stamatiadis, C., & Gartner, N.H. (1996). MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1554(1), 9–17. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400102>.
9. Gartner, N.H., Assman, S.F., Lasaga, & F. Hou, D.L. (1991). A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(1), 55–74.
10. Chang, E.C.P., Messer, C.J., & Marsden B.G. (1985). Reduced-Delay Optimization and Other Enhancements in the PASSER 11-84. *Transportation Research Record*, 1005, 80–89.
11. Robertson, D.I. (1986). Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, 56, 36–40.
12. Tsay, H.S., & Lin, L.T. (1988). New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1194, 15–30.
13. Lin, L.-T., Tung, L.-W., & Ku, H.-C. (2009). Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 136(8), 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000123).
14. Ye, B. L., Wu, W., & Mao, W.A. (2015). Two-way Arterial Signal Coordination Method with Queuing Process Considered. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2461493>.
15. Chen, C., Chen, X., Huang, W., & Li, K. (2019). A Two-Way Progression Model for Arterial Signal Coordination Considering Side-Street Turning Traffic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 1627–1650. <https://doi.org/10.1080/21680566.2019.1672590>.
16. Chen, Y.-H., Cheng, Y., & Chang, G.-L. (2022). Incorporating Delay Minimization in Design of the Optimized Arterial Signal Progression. *Transportation Research Record*, 2676(4), 649–668. <https://doi.org/10.1177/03611981211064281>.
17. Timmerman, R.W., & Boon, M.A.A. (2021). Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(3), 278–307. <https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1692962>.
18. Zhu, H., & Nakamura, H. (2022). Modelling discharge flows at signalised intersections with adjustment of downstream effects. *Transportmetrica A: Transport Science*, 18(3), 736–761. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1895360>.
19. Horbachov, P.F., Makarichev, O.V., & Liubiyi, Ye.V. (2024). Simulation Modeling of the Advance Time in Coordination Planon City Highways. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 3, 112–124. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-112-124>.
20. TRB. (2016). Highway Capacity Manual. National Research Council, Washington.

***Ye. Liubiy, P. Horbachov, S. Kapinus, O. Hubariev* Experimental estimation of the impact of advance time on the efficiency of a coordination plan**

The article examines the pressing issue of enhancing the efficiency of coordinated urban traffic control systems through the consideration of advance time required for the acceleration of additional vehicles accumulating in front of the stop line at successive intersections in a coordination plan. In contrast to foreign practices of implementing adaptive traffic control systems, under Ukrainian conditions, financial and infrastructural constraints dictate that coordinated signal control (green wave) remains the primary instrument for effective traffic control in cities. Existing methods for designing coordination plans do not account for the influence of additional vehicles emerging from secondary approaches to coordinated intersections, nor the time required for queues to accelerate to the speed of the main traffic flow. This reduces the overall efficiency of coordination and makes it impossible to ensure the smooth flow of vehicles along coordinated arterials. The challenge of defining and integrating advance time into coordination models remains unresolved despite numerous efforts aimed at optimizing the bandwidth of the green wave and harmonizing traffic flows speed. To provide an experimental estimate of the impact of advance time on coordination plan efficiency, a simulation model of a coordinated arterial segment was developed in the VISSIM, based on the case study presented in HCM 2016. The variable parameter of the model was advance time. Simulation results revealed that the average travel time along the arterial decreases as advance time increases up to six seconds, whereas further increases beyond this threshold lead to a sharp deterioration of traffic conditions on secondary approaches. These findings highlight that incorporating advance time into coordination plan can significantly improve the performance of primary traffic flows within the green wave. At the same time, the results emphasize the necessity of continuous monitoring of traffic demand on secondary approaches to avoid excessive delays and ensure balanced efficiency of the overall traffic control system.

Key words: traffic control, coordination plan, signalized intersections, traffic simulation, advance time, VISSIM.

ЛЮБИЙ Євген Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

ГОРБАЧОВ Петро Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8180-4072>.

КАПІНУС Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: skapinus13@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-5520-2337>.

ГУБАРЕВ Олександр Семенович, аспірант кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: len02082016@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5474-3216>.

Yevhen LIUBYI, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

Peter HORBACHOV, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8180-4072>.

Serhii KAPINUS, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Road Traffic Management and Safety Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: skapinus13@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-5520-2337>.

Oleksandr HUBARIEV, Post-Graduate Student of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: len02082016@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5474-3216>.

Дата надходження статті до видання: 28.08.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1927

Максимова О.С., Максимов С.В., Потапенко В.В.
Криворізький національний університет

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЛУЗЕВОЇ ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ РЕМОНТІВ І ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО АВТОТРАНСПОРТУ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ

У роботі обґрунтовано та формалізовано критерій визначення оптимального рівня централізації проведення поточних ремонтів і технічного обслуговування технологічного автотранспорту залізорудних кар'єрів. Встановлено форми функціонального зв'язку та отримано аналітичні залежності між величиною витрат на технічне обслуговування і ремонт кар'єрних автосамоскидів. Визначено залежність між надійністю машин і часом їх роботи для забезпечення плану технологічних перевезень гірничої маси у випадках, коли такі ремонти виконуються власними силами або шляхом використання фірмового чи сервісного обслуговування на спеціалізованих підприємствах з індустріальними методами. Це дає змогу визначити рівень галузевої централізації робіт із технічного обслуговування й ремонту кар'єрного автотранспорту, що дозволяє мінімізувати питомі експлуатаційні витрати на одиницю транспортної роботи.

Для вирішення поставлених завдань використано методи техніко-економічного, кореляційно-регресійного, факторного та ситуаційного аналізу (для дослідження процесів організації ремонтів кар'єрних автосамоскидів на гірничодобувних підприємствах або в мережі сервісних центрів); методологію оптимального управління, що забезпечує економіко-математичну формалізацію складових моделі визначення рівня галузевої централізації ремонтів технологічного автотранспорту відповідно до умов його експлуатації; метод порівняльного економічного аналізу (для оцінки економічної ефективності запропонованої моделі перерозподілу коштів, що виділяються на відновлення працездатності кар'єрних самоскидів).

Розраховано оптимальний рівень централізації технічного обслуговування і ремонтів кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 130 т для перевезення гірської маси в залізорудних кар'єрах, а також обґрунтовано можливість забезпечення планового часу їх роботи на технологічних перевезеннях.

Ключові слова: транспортний комплекс залізорудного кар'єру, витрати на ремонт, ремонти власними силами, ремонти силами спеціалізованих організацій, статистичні методи контролю та управління.

ВСТУП

Більшість діючих залізорудних комбінатів України були збудовані понад 60 років тому. При цьому річний видобуток руди відповідно до технології її переробки залишається майже незмінним протягом усього періоду експлуатації, з незначними коливаннями залежно від попиту на сировину. Основним видом технологічного автотранспорту, що використовується для перевезень у залізорудних кар'єрах України, є автосамоскиди «БелАЗ», парк яких в останні роки поповнюється найпопулярнішими моделями гірничої техніки – автосамоскидами «Caterpillar».

Для технічного обслуговування та ремонту цієї техніки на кожному гірничозбагачувальному комбінаті була створена виробничо-технічна база, розрахована на обслуговування автосамоскидів вантажопідйомністю 35–50 т у кількості 150–200 машин (у середньому 5–7 одиниць на 1 млн. т перевезеної гірничої маси при обсягах перевезень від 30 до 60 млн. т). У таких цехах виконували повний комплекс робіт (окрім капітального ремонту) для підтримання рухомого складу у працездатному стані, а їхня загальна площа сягала 8–12 тис. м².

З часом вантажопідйомність кар'єрних автосамоскидів зростає до 130–220 т, тоді як загальна чисельність технологічних машин скоротилася до 25–40 одиниць, при практично незмінних параметрах гірничотранспортних цехів. На сьогодні, вони використовуються лише на 10–20% від проектної потужності. Практично на кожному кар'єрі спостерігається неефективне використання технологічного обладнання таких ГТЦ, оскільки виробничі дільниці з ремонту вузлів і агрегатів, хоч і оснащені відповідно до технологічних потреб, залишаються майже не завантаженими роботою. Персонал виконує переважно нерегулярні відновлювальні ремонти, що негативно позначається на їхній якості.

Показники роботи технологічного автотранспорту на найбільшому у Кривому Розі Інгулецькому гірничо-збагачувальному комбінаті наведено в табл. 1. За основу аналізу взято найбільш стабільний період перед початком широкомасштабної війни – 2020–2021 рр.

Таблиця 1 Показники роботи технологічного автотранспорту ПрАТ «Інгулецький ГЗК»

№ з/п	Показник	Рік			
		2020		2021	
		факт	%	факт	%
1	Середньооблікова кількість великовантажних автосамоскидів, од.	52,0		57,4	
2	Перевезено гірничої маси, тис.т	50667,3	-	60577,3	-
3	Час в господарстві, авто-год.	456768	-	491923	-
4	Час в наряді, авто-год.	290003	-	324538	-
5	Простої всього, авто-год.	166765	100	177285	100,0
6	Планові простої, авто-год.	160557	96,3	154302	87,0
	- в ремонті	63677	38,2	81104	45,7
	- в очікуванні ремонту	1464	0,9	4368	2,5
	- регламентовані перерви	43 722	26,2	43 650	24,6
	- інші планові простої	51 694	31,0	25 180	14,2
7	Непланові простої, авто-год.	6 208	3,7	22 983	13,0
8	Коефіцієнт технічної готовності	0,711	-	0,772	-
9	Коефіцієнт використання обладнання	0,635	-	0,640	-

Проектне значення коефіцієнта технічної готовності рухомого складу визначається нормами простою для кожного виду технічних впливів (ТО, ПР та КР) та періодичністю їх проведення, передбаченою «Положенням про технічне обслуговування, діагностування й ремонт кар'єрних самоскидів БЕЛАЗ» [4]:

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + \left(\frac{t_{ПРi}}{t_{Hi}} \right)}, \quad (1)$$

де $t_{ПРi}$ – час простою кар'єрного самоскида на i -му виді технічного обслуговування або ремонтів, год.; t_{Hi} – норма пробігу до i -го виду технічного обслуговування або ремонту, мото-год.

Для автосамоскидів вантажопідйомністю 130-136 т, що є основою рухомого складу ІнГЗК, проектне значення КТГ буде складати:

$$\alpha_T = \alpha_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{t_{ПРi}}{t_{Hi}} \right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{5}{250} + \frac{14}{500} + \frac{19}{1000} + \frac{100}{5000} + \frac{170}{10000} + \frac{9,5}{100} \right)} = 0,836$$

Як свідчать дані аналізу, тривалість робіт з технічного обслуговування та ремонтів кар'єрних автосамоскидів перевищувала передбачені регламентом показники на 76,2% у 2020 році та на 39,0% у 2021 році.

Крім того, значна частина рухомого складу перебувала у простої: через регламентовані перерви – 26,2% та 24,6%, а також через нерегламентовані простої – 3,7% та 13,0% відповідно за аналізованими роками. У результаті загальний час корисного використання технологічного автотранспорту становив лише 63,5% та 64,0% від календарного фонду часу роботи при безперервному режимі роботи кар'єру.

Таким чином, існують значні резерви підвищення ефективності роботи технологічного автотранспорту залізрудного кар'єру як шляхом удосконалення системи його технічного обслуговування і ремонтів, так і завдяки покращенню загальних умов організації виробничого процесу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Незадовільна організація ремонтного обслуговування, виконання ремонтних робіт у неповному обсязі та з низькою якістю є однією з основних причин аварійних виходів устаткування з ладу [7]. Підприємства залізрудної промисловості щороку недоотримують понад 1 млн. т залізної руди через аварійні простої кар'єрного устаткування. За нашими розрахунками, скорочення простоїв під час

ремонтів до нормативного рівня на одному гірничорудному підприємстві може забезпечити додатковий обсяг продукції більш як на 4,8 млн.грн на рік [4]. Ці втрати є відчутними, і завдання їх зниження значною мірою залежить від раціоналізації ремонтного виробництва.

Між показниками витрат в основному виробництві та витратами на ремонтне обслуговування існує тісний взаємозв'язок, який був предметом досліджень багатьох учених. Встановлено, що зі збільшенням витрат на ремонти скорочується обсяг витрат, викликаний експлуатацією несправного устаткування, простоями внаслідок аварій чи очікуванням ремонтних робіт [2]. Графічно таке співвідношення виражається монотонно спадної функції з асимптотичним наближенням залежної змінної до деякого рівня, притім тільки при нескінченно великих значеннях аргументу. Це означає, що повністю ліквідувати втрати можливо лише за умов надмірно високих витрат на ремонти, оскільки кожний наступний приріст таких витрат призводитиме до дедалі меншого скорочення виробничих витрат.

Процес зростання витрат на ремонти обладнання має критичну точку, після перевищення якої подальше збільшення витрат не забезпечує пропорційного скорочення витрат. Цю залежність доцільно розглядати як баланс, у якому врівноважуються витрати на ремонти та відповідні їм втрати основного виробництва, спричинені порушенням нормального функціонування устаткування.

Таким чином, баланс витрат на ремонти вважається економічно ефективним лише тоді, коли їх приріст (ΔZ) не перевищує досягнутого при цьому скорочення витрат у основному виробництві (ΔB), тобто за умови виконання нерівності:

$$[\Delta Z / \Delta B] \leq 1. \quad (2)$$

Можна виділити три етапи формування рівня річних витрат на ремонт устаткування та визначити напрямки підвищення ефективності ремонтного виробництва.

До першого відноситься сфера виробництва знярядь праці (їх проектування та виготовлення). На цьому етапі, аналізуючи конструктивні можливості машини, матеріалів і технологій її виробництва, можна оцінити потенційну величину майбутніх затрат на ремонти. На цій стадії можна управляти функцією затрат на ремонти - змінюючи параметри машини, поліпшуючи її ремонтпридатність, здійснюючи оптимізацію міжремонтних періодів шляхом регулювання термінів служби елементів машини та збільшуючи або зменшуючи їхню надійність.

До другого етапу, що визначає величину річних ремонтних витрат, відноситься сфера експлуатації устаткування, зайнятого в основному технологічному процесі. Величина витрат, в даному випадку, залежить від таких техніко-економічних умов, як: ступінь зношеності машин і устаткування; вікового складу засобів праці; гірничо-геологічних і технологічних умов їхньої роботи; досвіду й кваліфікації персоналу, що експлуатує устаткування; наукової організації праці й культури виробництва тощо.

Зниження витрат на ремонти у цих умовах залежить, в основному, від прийнятих технологічних схем організації основного виробництва, можливостей заміни устаткування та ступеня підготовленості обслуговуючого персоналу.

Третім, основним етапом формування величини витрат на ремонт і утримання устаткування, є сама сфера ремонтного виробництва. В результаті підвищення ефективності ремонтів машин і обладнання, може бути отримана значна економія матеріальних, трудових і грошових ресурсів. Однак, існуючі заходи щодо підвищення технічного рівня й збільшенню виробничих потужностей ремонтних підрозділів і спеціалізованих заводів носять обмежений, місцевий характер.

На величину витрат у ремонтному виробництві, при сформованому технічному рівні впливає форма організації ремонтного обслуговування. Організація ремонтного виробництва дозволяє ефективно об'єднати працівників, засоби праці й предмети праці в єдине ціле, підвищити якість їх використання, перетворюючи з розрізнених факторів виробництва в єдину продуктивну силу.

Щодо необхідності підвищення ефективності ремонтного виробництва зазначає багато науковців, що присвятили свої праці питанням ремонту [1, 3, 5, 9]. Єдиною методикою цих досліджень є визначення для кожної конкретної моделі машин функціональної залежності

експлуатаційних витрат від часу $B = f(t)$, яка використовується для всіх можливих моделей вдосконалення рівня організації ремонтного виробництва. Характер зміни такої залежності поширюється на весь планований період експлуатації машин даної моделі. При цьому не враховується, що зміна організаційних умов експлуатації й ремонту обладнання впливає на темп приросту ремонтно-експлуатаційних витрат та на те, якому рівню організації ремонтного

виробництва (централізації, спеціалізації або концентрації) відповідає крива. Проведені дослідження показали можливість різкого (східчастого) зниження рівня таких витрат, що виникає при переході від індивідуальних методів ремонту до ремонту машин в умовах спеціалізованих підприємств.

На сьогодні рівень організації ремонтного виробництва значно відстає від рівня організації виробництва машин і обладнання. Якщо в машинобудуванні широко використовується великосерійне виробництво, потокові лінії, то в ремонтних службах через малий обсяг ремонтів при децентралізованій формі їхньої організації дотепер переважають кустарні, індивідуальні методи ремонтних робіт.

Найбільш прогресивним формам організації ремонтних робіт, зокрема застосуванню сервісного ремонту, відповідають ідеальні умови ремонтного виробництва, що характеризуються найменшими витратами на ремонт і експлуатацію обладнання та найменшими темпами їхнього збільшення [4, 6, 8]. Подальше зниження рівня витрат обмежується тільки надійністю елементів і досконалістю конструкції машини.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

До початку сімдесятих років двадцятого століття на гірничорудних підприємствах України децентралізована форма організації ремонтів технологічного обладнання була загальноприйнятою. Ремонтні роботи вимагали залучення великої кількості робітників високої кваліфікації. Усе це, природно, призводило до постійного зростання матеріальних і трудових витрат, що відволікалися на ремонтні роботи.

З метою підвищення ефективності ремонтних робіт і створення умов для розвитку централізації й спеціалізації ремонтів на початку 70-х років почали створюватися спеціалізовані ремонтні підприємства. Вони відіграли позитивну роль, звільнивши частину робітників, зайнятих ремонтом обладнання, підвищивши якість ремонтів, забезпечивши спеціалізацію у виробництві запасних частин і виконанні капітальних ремонтів.

Набуття незалежності Україною на початку дев'яностих років та пов'язана з цим економічна криза призвели до втрати більшістю підприємств своїх оборотних коштів, а відповідно — і можливості оплачувати послуги з ремонту технологічного обладнання стороннім організаціям. Це порушило сталу систему індустріального ремонту технологічного обладнання гірничорудних підприємств. Вижили лише ті нечисленні ремонтні підприємства, без продукції яких існування гірничорудної галузі було неможливим.

Спеціалізований або фірмовий ремонт технологічного автотранспорту на гірничорудних підприємствах України почав відроджуватися у 2010 році, коли виробник техніки БЕЛАЗ – ВАТ «Білоруський автомобільний завод» створив мережу сервісних центрів ТОВ «БЕЛАЗ СЕРВІС Україна» для забезпечення технічного сервісу продукції БЕЛАЗ, що експлуатується у споживачів. В Криворізькому залізничному басейні воно було представлено товариством з обмеженою відповідальністю «КРИВБАС-БЕЛАЗ-СЕРВІС СП», що спеціалізується на поставках оригінальних запасних частин торговельної марки «БЕЛАЗ» і наданню сервісних послуг з ремонту й технічному обслуговуванню кар'єрної техніки на підвідомчій території.

Всі ремонтні роботи виконуються з використанням оригінальних запасних частин по технічній документації заводів-виготовлювачів на атестованих робочих місцях, відповідно до вимог нормативно-технічної документації й діючих стандартів, з наданням гарантійних зобов'язань.

Європейський Союз Постановою Ради ЄС 2021/997 від 21 червня 2021 року про обмежувальні міри щодо Білорусі, включив «БЕЛАЗ» у список підсанкційних осіб, після чого робота «КРИВБАС-БЕЛАЗ-СЕРВІС СП» почала згортатися. У 2021 році підприємством було отримано чистого прибутку у розмірі 89483,0 тис. грн. при чисельності працівників у 131 особу, а у 2024 році «КРИВБАС-БЕЛАЗ-СЕРВІС СП» вже отримало збиток у розмірі 1378,5 тис. грн з чисельністю персоналу у 12 осіб.

Сьогодні основними партнерами по ремонту і технічному обслуговуванню вузлів і агрегатів кар'єрних автосамоскидів «БЕЛАЗ» є такі підприємства, як ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Дизельний завод, ПрАТ «Криворізький завод гірничого обладнання» (ПрАТ «КЗГО»), ТОВ «НВП «ГРМАШ», ТОВ «БЕЛАЗУКРРЕМСЕРВІС», ПрАТ «ЕЛЕКТРОЗАВОД», ПрАТ «ЕЛЕКТРОМАШПРОМСЕРВІС» та ін.

Ідея централізації та спеціалізації робіт у будь-якому її прояві сьогодні відображає загальний дух організаційних та технічних перетворень у ремонтному виробництві. Виникає необхідність наукового обґрунтування оптимального співвідношення між роботами, виконаними господарським і

підрядним способом, рівнем централізації ресурсів та темпами розвитку спеціалізованих ремонтних підрозділів.

Постановка питання про досягнення саме оптимального (раціонального) рівня централізації не є випадковою. Прагнення максимально використати переваги спеціалізації — передові технології ремонтних робіт, сучасне обладнання, висококваліфіковані кадри — зустрічає опір як об'єктивного, так і суб'єктивного характеру.

До об'єктивних чинників належать:

- наявність непланових (аварійних) ремонтів, для виконання яких підприємство має утримувати власний штат ремонтних робітників;
- роботи з технічного обслуговування та налагодження, для яких свідомо недоцільно залучати працівників спеціалізованих ремонтних підприємств.

Аналіз рівня централізації ремонтних робіт на гірничо-збагачувальних комбінатах Кривого Рогу, що визначається співвідношенням обсягів ремонтів, виконаних різними організаційними способами (табл. 2), свідчить про значні коливання показника — від 23,5 % на ПрАТ «Центральний ГЗК» до 39,0 % на ПрАТ «Північний ГЗК».

Аналіз виконання робіт з технічного обслуговування та ремонтів технологічного автотранспорту на ПрАТ «Інгулецький ГЗК» (ІНГЗК) наведено у табл. 2.

Таблиця 2 Аналіз результатів ремонтів і обслуговування технологічного автотранспорту ПрАТ «ІНГЗК»

№ з/п	Показник	Рік			
		2020		2021	
		факт	%	факт	%
1	Середньооблікова чисельність штатних робітників	815	100,0	812	100,0
	З них:	237	29,1	272	33,5
	- водії БЕЛАЗ				
	- машиністи бульдозерів в кар'єрі	99	12,1	110	13,5
	- ремонтна група	368	45,2	328	40,4
	- керівники, спеціалісти та службовці	108	13,3	102	12,6
2	Фонд заробітної плати ремонтників, тис.грн	52433,4	41,8	56842,2	35,4
3	Вартість запчастин і матеріалів для ремонтів і технічного обслуговування, тис.грн	43424,6	34,6	55801,6	34,7
4	Всього вартість поточних ремонтів і технічного обслуговування, тис.грн	125482,1	100,0	160597,9	100,0
5	У тому числі:	95858,0	76,4	112644,8	70,1
	- власними силами				
	- послуги сторонніх організацій	29624,1	23,6	47953,1	29,9
6	Коефіцієнт централізації ремонтних робіт, %	23,6	-	29,9	-

Як бачимо, зростає вартість робіт з підтримання рухомого складу в працездатному стані. Темп зростання вартості робіт виконаних централізованим способом поступово перевищують темп зростання ремонтних робіт виконаних власними силами.

Основним джерелом зниження витрат в ремонтному виробництві є обґрунтування раціонального рівня централізації ремонтних робіт при умові забезпечення заданої надійності роботи рухомого складу – планового часу його роботи на технологічних перевезень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

При розв'язанні задачі визначення оптимального рівня централізації ремонтів, велике значення має вибір форми функціонального зв'язку між результатами ремонтних робіт і витратами на ремонти, що викликали їх. Найбільш повно ця залежність описується, на нашу думку, виробничою функцією виду CES:

$$Y = a_0 \cdot \left(a_1 \cdot X_1^{-\beta} + a_2 \cdot X_2^{-\beta} \right)^{-1/\beta}, \quad (3)$$

де Y - результати ремонтних робіт, що дорівнюють плановій кількості технологічного

обладнання, максимально можливий час роботи якого забезпечено в результаті виконання ремонтів, тис.авто-год.; X_1 – вартість ремонтів, що виконуються господарським способом, тис.грн.; X_2 – вартість ремонтів, що виконуються підрядним способом, тис.грн.; a_1, a_2, a_0 - параметри функції.

Перевага багатофакторної функції типу CES для аналізу результатів ремонтного виробництва полягає в тому, що вона добре узгоджується з фактичними змінами результатів ремонтних робіт залежно від способів їх виконання. Так, при рівності одного з видів витрат — централізованого або децентралізованого ремонту — нулю, функція набуває лінійного вигляду щодо іншого виду витрат. При спільній дії витрат функція має нелінійний характер. Зі зростанням одного з видів витрат вона монотонно збільшується, причому темп зростання сповільнюється, і намічається тенденція наближення до певного рівня, коли функція знову стає лінійною. Аналогічно, на практиці при використанні одного з видів обслуговування витрати зростають прямо пропорційно зростанню парку обслуговуваного устаткування. Застосування змішаного виду ремонтів підвищує ефективність ремонтних робіт, знижуючи величину витрат праці на одиницю отриманого результату.

Обрана функція нелінійна щодо своїх параметрів, що ускладнює їх розрахунок і не дозволяє, зокрема, застосувати звичайний метод найменших квадратів. Нами запропоновано спосіб оптимізації параметрів функції типу CES у межах передбачуваного інтервалу їх зміни, що забезпечує достатню точність обчислень. Суть методу полягає в тому, що перед початком розрахунків задаються інтервали зміни кожного параметра функції на основі практичного досвіду або результатів попередніх досліджень:

$$\begin{aligned} a_0 &= a_{0\min} \div a_{0\max}; \\ a_1 &= a_{1\min} \div a_{1\max}; \\ a_2 &= a_{2\min} \div a_{2\max}; \\ \beta &= \beta_{\min} \div \beta_{\max}. \end{aligned} \quad (4)$$

Програма обчислень оптимальних значень параметрів побудована на переборі їх комбінацій у межах заданих інтервалів змін. Критерієм вибору служить мінімум суми квадратів відхилень фактичних значень результуючого показника (Y факт) від розрахункового (Y розр), тобто виконання умови:

$$\Sigma \left(Y_{\text{розр}} - Y_{\text{факт}} \right)^2 = \min. \quad (5)$$

В результаті розрахунків на друкований пристрій виводяться найменше відхилення розрахункового значення функції від вихідних статистичних даних та відповідне значення параметрів a_0, a_1, a_2, β . Вони будуть тим точнішими, чим меншим приростом шуканих параметрів ми задамося. Однак запропонований метод отримання параметрів максимально наближених до оптимальних обмежується зростаючим обсягом досліджень.

Отримана функціональна залежність дозволяє розрахувати оптимальні значення обсягів ремонтних робіт, що виконуються централізованим і децентралізованим способом при заданому парку кар'єрних автосамоскидів, а також оптимальний коефіцієнт централізації ремонтних робіт.

Формування оптимальної комбінації видів витрат праці ремонтному виробництві здійснюється з допомогою множників Лагранжа. Заданий рівень результату ремонтних робіт необхідно отримати якомога дешевше. Це означає, що потрібно мінімізувати ресурси C залучення кожного виду витрат праці.

$$C = X_1 + X_2. \quad (6)$$

Для отримання виразу Лагранжа у задачі максимізації перепишемо обмеження у звичайному вигляді:

$$X_1 + X_2 - C = 0. \quad (7)$$

Помноживши його на штучний множник λ , додамо до вихідної функції та отримаємо функцію Лагранжа:

$$Y = a_0 \cdot \left(a_1 \cdot X_1^{-\beta} + a_2 \cdot X_2^{-\beta} \right)^{-1/\beta} + \lambda (X_1 + X_2 - C) \quad (8)$$

Доведено, що значення змінних, що максимізують функцію Лагранжа, є одночасно і вирішенням вихідної задачі максимізації. Оскільки в нашому завданні функція Лагранжа включає три змінні, то умовою її максимізації є рівність нулю трьох похідних. Отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dY}{dX_1} = \frac{a_1}{a_0} \cdot \left(\frac{Y}{X_1}\right)^{1+\beta} + \lambda = 0; \\ \frac{dY}{dX_2} = \frac{a_1}{a_0} \cdot \left(\frac{Y}{X_2}\right)^{1+\beta} + \lambda = 0; \\ \frac{dY}{d\lambda} = X_1 + X_2 - C = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Її рішення дозволяє отримати такі значення змінних:

$$X_1 = C \cdot \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}; \quad (10)$$

$$X_2 = C \cdot \left(\frac{a_2}{a_1 + a_2}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}; \quad (11)$$

$$\lambda = -a_0^\beta \cdot (a_1 + a_2) \cdot \left[a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} + a_2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1 + a_2}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \right]^{-\frac{1+\beta}{\beta}}. \quad (12)$$

З виразів (10) та (11) отримуємо:

$$X_1 = X_2 \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}; \quad (13)$$

$$X_2 = X_1 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}. \quad (14)$$

Підставивши значення X_1 і X_2 у вихідне рівняння отримаємо такі вирази:

$$Y = a_0 \cdot X_1 \cdot \left[a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \right]^{-\frac{1}{\beta}}; \quad (15)$$

$$Y = a_0 \cdot X_2 \cdot \left[a_2 + a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \right]^{-\frac{1}{\beta}}.$$

З виразу (15) знаходимо оптимальне значення витрат праці X_1^{onm} :

$$X_1^{onm} = \frac{Y}{a_0} \cdot \left[a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{-\frac{\beta}{1+\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (16)$$

З виразу (16) також знаходимо оптимальне значення витрат праці X_2^{onm} :

$$X_2^{onm} = \frac{Y}{a_0} \cdot \left[a_2 + a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{\beta}{1+\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (17)$$

Величина оптимального коефіцієнта централізації ремонтних робіт визначається з виразу:

$$K_{ц}^{onm} = \frac{X_1^{onm}}{X_1^{onm} + X_2^{onm}} \quad (18)$$

Обчислені рівняння залежності результатів ремонтних робіт з ремонту технологічного автотранспорту від витрат праці на ІНГЗК має такий вигляд:

$$Y = 3,838088 \cdot \left(0,6826 \cdot X_1^{0,7326} + 0,3174 \cdot X_2^{0,7326} \right)^{1,3652}$$

Характер зміни результатів ремонтних робіт від зміни витрат праці, на прикладі гірничотранспортного цеху, представлений на рис. 1 та рис. 2.

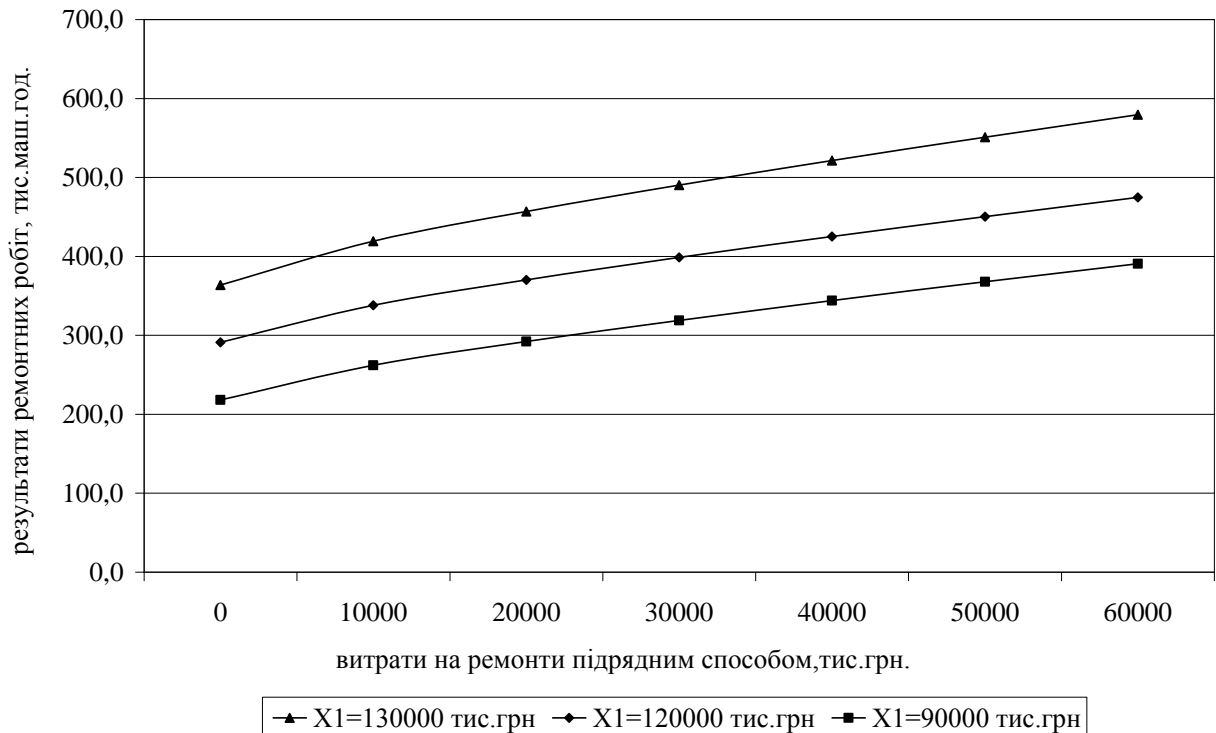


Рисунок 1. Залежність результатів ремонтного виробництва від зміни витрат праці на ремонти централізованим способом

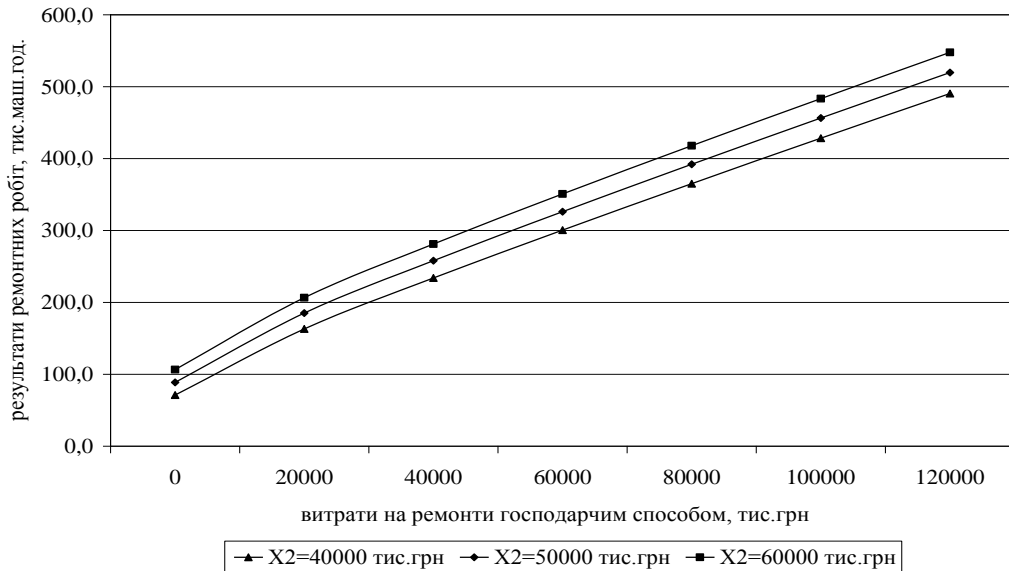


Рисунок 2. Залежність результатів ремонтного виробництва від зміни витрат праці на ремонти господарським способом

На підставі розрахованих рівнянь розраховано оптимальні співвідношення витрат праці на ремонт централізованим та децентралізованим способом в гірничотранспортному цеху гірничозбагачувального комбінату. Результати розрахунків зведено у табл. 3.

Таблиця 3 Розрахунок оптимального рівня централізації ремонтних робіт в умовах гірничотранспортного цеху ІнГЗК

Показник	Результат використання обладнання, тис. маш.год.	Витрати на виконання ремонтних робіт, тис. грн			
		Всього	централізовано	децентралізовано	$K_{ц}$, %
Фактичне співвідношення	324,5	160597,9	47953,1	112644,8	29,9
Оптимальне співвідношення	324,5	157461,4	62610,5	95850,9	39,1

Оптимальні значення витрат є єдино можливими, що забезпечують максимум результату. Будь-які відхилення у тому співвідношенні у той чи інший бік призводить до зниження результатів ремонтного виробництва (рис. 3).

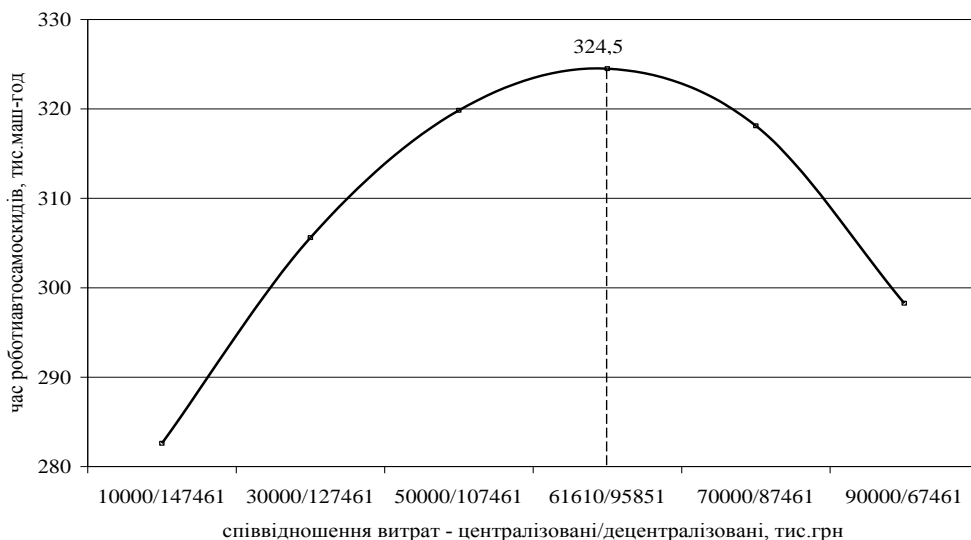


Рисунок 3. Залежність результатів ремонтного виробництва від комбінації витрат праці на ремонти централізованим та децентралізованим способом

Розрахунки показують, що впровадження оптимального рівня централізації ремонтних робіт дозволить заощадити в умовах комбінату 105 тис. люд.-год. сукупних витрат праці ремонтного персоналу (7,26% всіх витрат), що еквівалентно умовному вивільненню близько 55 осіб.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, вирішено реальну науково-практичну задачу встановлення оптимального рівня централізації ремонтних робіт, що забезпечує їх ефективне виконання. Запропоновані в роботі методики дозволяють формалізувати процеси розподілу бюджету гірничозбагачувального підприємства, виділеного на відновлення працездатності технологічного автотранспорту, з метою забезпечення максимального рівня надійності його роботи. Запропонована методика, на відміну від існуючих, спрямована на підвищення ефективності експлуатації автосамоскидів, враховує специфічні умови їх експлуатації та поточні виробничо-економічні можливості підприємства, забезпечує достатній компроміс між мінімізацією витрат на ремонт і високим рівнем надійності технологічного автотранспорту, що гарантує плановий час роботи автосамоскидів на технологічних перевезеннях.

ВИСНОВКИ

Виконані розрахунки показали, що для забезпечення планового часу роботи автосамоскидів на технологічних перевезеннях, що відповідає умовам базового періоду, при оптимальному рівні централізації ремонтних робіт економія на ремонтних витратах складає 3136,5 тис. грн, або 9,5% всіх ремонтних витрат.

Подальші дослідження будуть зосереджені на визначенні стратегій порівняння оцінок планових ресурсів залізничних підприємств, що використовуються для ремонту кар'єрних автосамоскидів та підтримки їхнього технічного стану. Це необхідно для прийняття рішень щодо бюджетування роботи цих підприємств або можливості використання вивільнених фінансових ресурсів, а також їхнього спрямування на інші цілі відповідно до визначеної стратегії подальшого розвитку технічного потенціалу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В. В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. Вісник машинобудування та транспорту. 2020. Т.1, № 11. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-4-10>.
2. Максимов С.В., Максимова О.С. Оптимізація структури ремонтних циклів кар'єрних самоскидів на основі дослідження надійності їх роботи. Вісник Криворізького національного університету. 2018. Т.16. №47. С.122-128.
3. Максимов С.В., Максимова О.С. Обґрунтування параметрів спеціалізованого підприємства з капітального ремонту двигунів кар'єрних самоскидів великої вантажопідйомності в умовах Кривбасу. Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво. 2020. №3. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2020-3-20>
4. Максимов С.В., Монастирська О.Ю. Економічна ефективність транспортної системи та її оцінка. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2011. № 121. – С. 127-130.
5. Максимов С.В., Монастирська О.Ю. Застосування динамічного підходу до використання критерію економічної ефективності автотранспортної системи кар'єру. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2012. №6(177). С. 26-30.
6. Монастирський Ю.А., Гальченко А.В., Вівчарик А.С. Аналіз парків кар'єрних самоскидів підприємств центральної частини України. Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2014. Т. 9, №1052. – С. 38-42.
7. Монастирський Ю.А. Денис В.М. Дослідження надійності роботи агрегатів підвіски кар'єрних автосамоскидів. Вісник Криворізького технічного університету. 2010. №. 26. С. 132-134.
8. Монастирський Ю.А., Бондар І.В., Сістук В.О. Математичні моделі функціонування підприємств технічного сервісу кар'єрних автосамоскидів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2019. № 2 (13). С. 124–130. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.95>.
9. Потапенко В.В. Аналіз моделі технологічних станів кар'єрних самоскидів БелАЗ. Вісник НТУ «ХП». 2013. Т. 29 (1002). С. 126-132.

REFERENCES

1. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V., Zamurenko, A.S. (2020). Formuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezen. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu*, 1(11). <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-4-10>.
2. Maksymov, S.V., Maksymova, O.S. (2018). Optymizatsiya struktury remontnykh tsykliv kar'ernykh samoskydiv na osnovi doslidzhennya nadiynosti yikh roboty. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 16(47), 122–128.
3. Maksymov, S.V., Maksymova, O.S. (2020). Obgruntuvannya parametriv spetsializovanoho pidpryyemstva z kapitalnoho remontu dvyhuniv kar'ernykh samoskydiv velykoi vantazhopidnomnosti v umovakh Kryvbasu. *Derzhava ta rehiony. Seriya: Ekonomika ta pidpryyemnytstvo*, 3. <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2020-3-20>.
4. Maksymov, S.V., Monastyrskaya, O.Y. (2011). Ekonomichna efektyvnist transportnoi systemy ta yii otsinka. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 121, 127–130.
5. Maksymov, S.V., Monastyrskaya, O.Y. (2012). Zastosuvannya dynamichnoho pidkhodu do vykorystannya kryteriia ekonomichnoi efektyvnosti avtotransportnoi systemy kar'ieru. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 6(177), 26–30.
6. Monastyrskiy, Y.A., Halchenko, A.V., Vivcharyk, A.S. (2014). Analiz parkiv kar'ernykh samoskydiv pidpryyemstv tsentralnoi chastyny Ukrainy. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya*, 9(1052), 38–42.
7. Monastyrskiy, Y.A., Denys, V.M. (2010). Doslidzhennya nadiynosti roboty ahragativ pidvisky kar'ernykh avtosamoskydiv. *Visnyk Kryvorizkoho tekhnichnoho universytetu*, 26, 132–134.
8. Monastyrskiy, Y.A., Bondar, I.V., & Sistuk, V.O. (2019). Matematychni modeli funktsionuvannya pidpryyemstv tekhnichnoho servisu kar'ernykh avtosamoskydiv. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(13), 124–130. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.95>.
9. Potapenko, V.V. (2013). Analiz modeli tekhnolohichnykh staniv kar'ernykh samoskydiv BelAZ. *Visnyk NTU "KhPI"*, 29(1002), 126–132.

Maksymova, O., Maksymov, S., Potapenko, V. Economic Efficiency of Centralized Maintenance and Servicing of Technological Vehicles in Iron Ore Quarries

The study substantiates and formalizes the criterion for determining the optimal level of centralization in performing routine maintenance and technical servicing of technological vehicles at iron ore quarries. The forms of functional relationships were established, and analytical dependencies were obtained between the costs of maintenance and repair of quarry dump trucks. The relationship between machine reliability and operating time necessary to meet the technological transport plan for ore was determined for cases where such repairs are performed in-house or through company-based or service maintenance at specialized enterprises using industrial methods. This approach allows determining the level of industry-wide centralization of maintenance and repair work for quarry vehicles, which enables minimizing specific operational costs per unit of transport work.

To solve the tasks set, methods of techno-economic, correlation-regression, factor, and situational analysis were used (for studying the organization of dump truck repairs at mining enterprises or in the network of service centers); the methodology of optimal management, which ensures the economic-mathematical formalization of the components of the model for determining the level of industry centralization of technological vehicle repairs according to operating conditions; and the method of comparative economic analysis (for assessing the economic efficiency of the proposed model for reallocating funds allocated to restore the operability of quarry dump trucks).

The optimal level of centralization of maintenance and repairs of 130-ton quarry dump trucks for ore transportation at iron ore quarries was calculated, and the feasibility of ensuring their planned operating time in technological transportation was substantiated.

Keywords: transport system of an iron ore quarry, repair costs, in-house repairs, repairs by specialized organizations, statistical methods of control and management.

МАКСИМОВА Олена Сергіївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: maxlenser@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7253-0105>

МАКСИМОВ Сергій Володимирович, кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: max_ser_vlad@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9932-1511>

ПОТАПЕНКО Володимир Володимирович, старший викладач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна e-mail: potapenko@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1439-1017>

Olena MAKSYMOVA, PhD (Economics), Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, Kryvyi Rih National University, e-mail: maxlenser@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7253-0105>

Sergey MAKSYMОВ, PhD (Economics), Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, Kryvyi Rih National University, e-mail: maxlenser@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7253-0105>

Vladimir POTAPENKO, Senior lecturer of Automobile Facilities Department, Kryvyi Rih National University, e-mail: potapenko@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1439-1017>

Дата надходження статті до видання: 07.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1928

Мармут І.А., Безвідний В.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВИКИДІВ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН АВТОБУСА З ДИЗЕЛЬНИМ ДВИГУНОМ

Невід'ємною частиною загальної проблеми, пов'язаної з удосконаленням конструкції автомобілів, що випускаються, підтримкою їх у працездатному стані, якістю палива, мастильних матеріалів та їх економією, поліпшенням дорожньої мережі та організацією руху транспортних машин, є їх токсичність.

Розробкою питань економії паливно-енергетичних ресурсів та зниження токсичності двигунів займалися багато дослідників і в даний час є значна кількість відповідних рекомендацій. Однак прості та досить ефективні пропозиції ще підлягають розробці.

Завдання оптимізації роботи пасажирського автотранспорту з урахуванням екологічної безпеки є однією зі складових регулюючої діяльності людини, спрямованої на оздоровлення міського середовища. Таким чином, зменшення шкідливих викидів двигунами автомобілів є найважливішою суспільною та соціальною проблемою.

При вирішенні цієї проблеми переважними є напрями, реалізація яких супроводжується економією палива та інших матеріально-технічних ресурсів. Відомі технічні рішення для зниження шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигунів зазвичай пов'язані зі зміною їх конструкцій (це потребує значних витрат) або застосуванням дорогих допоміжних пристроїв для нейтралізації шкідливих речовин (їх установка на автомобіль часто супроводжується погіршенням економічності двигуна). У зв'язку з цим доцільно насамперед впливати на ті чинники, які дозволяють знизити шкідливі викиди автомобілями (і, відповідно, витрату палива) під час виконання транспортної роботи.

У статті розроблено математичні моделі для розрахунку викидів токсичних речовин автобусів із дизельними двигунами. Також виконано аналіз результатів машинного експерименту щодо розрахунків шкідливих викидів на прикладі автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Одним із напрямів підвищення паливної економічності та екологічної безпеки автобусів є використання на практиці раціональних режимів руху. Це дозволяє розглядати статтю, спрямовану на підвищення ефективності технічної експлуатації автомобілів за рахунок економії палива та зниження токсичності, актуальною.

Ключові слова: автобус, умови експлуатації, шкідливі викиди, екологічна безпека, математичні моделі, швидкість руху.

ВСТУП

Рухомий склад автомобільного транспорту є найважливішим фактором впливу на атмосферу, літосферу та гідросферу і тому він повинен розглядатися як складова глобальної екологічної проблеми країни. Негативний вплив автомобілів на довкілля проявляється насамперед у викидах шкідливих речовин з відпрацьованими газами – оксидів азоту, вуглецю, вуглеводнів, альдегідів, сажі та ін. Кількість токсичних компонентів, що викидаються рухомим складом автотранспорту, приблизно в 5-6 разів більша, ніж усіма іншими видами транспорту, разом узятими. Особливо це є актуальним для міст, де функціонує міський транспорт. Досі активно на маршрутах експлуатуються автобуси із дизельними двигунами. Як показують численні дослідження, дизельні двигуни є більш токсичними порівняно з іншими типами силових агрегатів [1, 2]. Тому питання щодо зниження шкідливого впливу міського транспорту є актуальними.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вирішенням проблеми екологічної безпеки займалися багато вчених України (Говорущенко М.Я., Гутаревич Ю.Ф., Канило П.М. та ін.). Аналіз їх робіт показав, що основними чинниками негативного впливу транспортних машин на довкілля є хімічні речовини, дим, вібрація, теплові викиди тощо. Робота автомобільного двигуна характеризується частою зміною швидкісних та навантажувальних режимів, на яких викидається певна кількість шкідливих речовин. Крім того, склад відпрацьованих газів значною мірою залежить від технічного стану двигуна та умов експлуатації. Для експлуатаційних цілей необхідно знати характеристики викиду шкідливих речовин у г/км залежно від швидкості руху, ваги автомобіля та сумарного дорожнього опору [1, 2].

Питання екологічної безпеки стоять на першому місці в усіх країнах. Проблемам шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння автомобілів присвячено багато публікацій зарубіжних дослідників.

Існує безліч методів оцінки токсичності відпрацьованих газів (ВГ). Основні з них такі:

а) метод оцінки токсичності ВГ під час експлуатації автомобілів – визначаються окремі

компоненти шкідливих речовин на найбільш характерних режимах роботи автомобіля [3];

б) метод безпосереднього вимірювання – проба ВГ фільтрується, охолоджується, з неї видаляється волога і аналізується на вміст CO , CO_2 , NO_x та C_nH_m [4]. Недоліки – можливість адсорбції вуглеводнів матеріалами вимірювальної системи і розчинення оксидів азоту у вологі, що сконденсувалися;

в) метод аналізу загального обсягу суміші газів за їздовий цикл [5-7];

г) метод часткового відбору проб за цикл з розведенням їх інертним газом – встановлюється співвідношення між кількістю повітря, що всмоктується в двигун, і кількістю ВГ (можна використовувати на автомобілі, що рухається) [8, 9];

д) спосіб аналізу розведених проб повітрям (CVS) – федеральний стандарт США, застосовується у Японії. Дослідження проводяться на всіх режимах руху автомобіля [10];

е) метод аналізу індивідуальних проб газу – метод дискретного аналізу та відбору проб із їх аналізом на хроматографі [11-14];

ж) моторні випробування дизелів на токсичність ВГ [15, 16].

Кількісними показниками токсичності автомобільних двигунів є значення масових викидів токсичних речовин [1, 2].

Основними методами визначення масового викиду токсичних речовин є:

а) метод визначення продуктів згоряння виходячи з кількості палива, що витрачається автомобілями – простий, але неточний метод, тому що при цьому не враховуються умови руху, експлуатаційні показники роботи автомобілів тощо;

б) метод визначення вагового викиду токсичних речовин, виходячи з транспортної роботи – має майже ті самі недоліки;

в) метод визначення масового викиду токсичних речовин пропорційне пробігу автомобілів – найбільш точний метод, однак і він не враховує нерівномірність та умови руху автомобілів містом.

Найбільш повно відображають реальні умови експлуатації їздові цикли, які широко застосовуються при випробуваннях автомобілів на паливну економічність і токсичність ВГ. Відомі наступні цикли [5]: Європейський вимірювальний цикл NEDC (New European Driving Cycle), Японський вимірювальний цикл JC08, Американський вимірювальний цикл EPA FTP-75 (Federal Test Procedure 75), світовий вимірювальний цикл – WLTP (World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure).

Однак, широке застосування їздових циклів в умовах підприємств автотранспорту неможливо з причин відсутності достатньої кількості необхідного обладнання, його складністю та високою вартістю, великою трудомісткістю та тривалістю перевірки. У зв'язку з цим можна віддати перевагу математичному моделюванню для оцінки економічних та екологічних показників при випробуваннях по їздових циклах із застосуванням експериментальних характеристик двигунів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є виявлення основних заходів, що сприяють зменшенню вагового викиду шкідливих речовин та підвищенню екологічної безпеки автобусів. Для цього необхідно вдосконалити математичну модель для розрахунку викидів окремих токсичних компонентів відпрацьованих газів і встановити їх кількісні залежності від основних експлуатаційних факторів (швидкості руху) за допомогою машинного експерименту (на прикладі автобуса Mercedes-Benz O530 Citaro C2 з дизельним двигуном (рис. 1)) [17];



Рисунок 1 – Автобус Mercedes-Benz O530/Citaro C2, для якого отримані розрахункові залежності

шкідливих викидів від швидкості руху

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Розробка математичних моделей для розрахунку викидів токсичних речовин автобусом Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Для розрахунку кількості шкідливих речовин Q' , г/км, при русі автобуса з різними експлуатаційними режимами (навантаження, швидкість) використовуємо формулу проф. Говорущенко М.Я. [2]:

$$Q' = 0,0548 M_{\text{вв}} \cdot \rho_{\text{п}} (A_2 + B_2 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_1^2) \times [A \cdot i_{\text{к}} + B \cdot i_{\text{к}}^2 \cdot V_{\text{а}} + C(G_{\text{а}} \cdot \psi + 0,077 \cdot kF \cdot V_{\text{а}}^2)] \cdot (\alpha_1 + b_1 \cdot N_1) / \eta_i, \quad (1)$$

де $M_{\text{вв}}$ – молекулярна маса токсичних речовин, г;
 $\rho_{\text{п}}$ – густина палива, г/см³;
 A_2, B_2, C_2 – постійні коефіцієнти для різних токсичних речовин;
 N_1 – відсоток використання потужності;
 A, B, C – постійні для даного автомобіля коефіцієнти;
 $i_{\text{к}}$ – середнє значення передавального числа коробки передач;
 $V_{\text{а}}$ – середня технічна швидкість автомобіля, км/год;
 $G_{\text{а}}$ – вага автомобіля, Н;
 ψ – коефіцієнт сумарного дорожнього опору;
 kF – фактор обтічності автомобіля, Н·с²·м⁻²;
 α_1, b_1 – постійні для даного двигуна коефіцієнти;
 η_i – індикаторний ККД.

Замінімо вираз $(\alpha_1 + b_1 \cdot N_1)$ через α (коефіцієнт надлишку повітря):

$$Q' = 0,0548 M_{\text{вв}} \cdot \rho_{\text{п}} (A_2 + B_2 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_1^2) \cdot [A \cdot i_{\text{к}} + B \cdot i_{\text{к}}^2 \cdot V_{\text{а}} + C(G_{\text{а}} \cdot \psi + 0,077 kF \cdot V_{\text{а}}^2)] \cdot \alpha / \eta_i. \quad (2)$$

Значення молекулярних мас токсичних речовин наведено у табл. 1 [2].

Таблиця 1 – Молекулярні маси токсичних речовин $M_{\text{вв}}$

Токсична речовина	Хімічна формула	Молекулярна маса, г
Оксид вуглецю	CO	28
Діоксид азоту	NO ₂	46
Вуглеводні бензинів*, наведені	C ₆ H ₁₄	86
Вуглеводні дизельних палив*, наведені	C ₉ H ₂₀	128

*Усереднено: змінюються за марками палив та залежно від походження сировини.

Значення постійних коефіцієнтів A_2, B_2, C_2 для бензинових (Б) і дизельних (Д) двигунів наведені в табл. 2 [2].

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів A_2, B_2, C_2

Коефіцієнт	X_{CO}		X_{CH}		X_{NO_2}	
	Б	Д	Б	Д	Б	Д
A_2	4,02	0,05	0,077	0,017	0,181	0,02
B_2	-0,122	-1,5·10 ⁻³	-1,83·10 ⁻³	0,31·10 ⁻³	7,02·10 ⁻³	2,3·10 ⁻³
C_2	0,935·10 ⁻³	14·10 ⁻⁶	0,137·10 ⁻⁴	2,47·10 ⁻⁶	-0,68·10 ⁻⁴	-4·10 ⁻⁶

Відсоток використання потужності двигуна N_1 , %, для розглянутого автобуса в спорядженому стані (С) із повним завантаженням (П) визначається за формулою (3) [2] при відповідних значеннях

N_{\max} та $\eta_{\text{тр}}$ (табл. 3) [18]:

$$N_1 = \frac{0,0277(G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3)}{N_{\max} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

де G_a – вага автомобіля, Н;

kF – фактор обтічності автомобіля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2$;

N_{\max} – максимальна потужність двигуна, кВт;

$\eta_{\text{тр}}$ – ККД трансмісії.

Таблиця 3 – Вихідні дані по автобусу Mercedes-Benz O530/Citaro C2

Показник	Значення показника
Індикаторний ККД η_i :	
– для спорядженого автобуса	0,48
– для автобуса з повним завантаженням	0,51
Робочий об'єм циліндрів V_h , л	14,618
Максимальна потужність двигуна N_{\max} , кВт	206
Передаточне число головної передачі i_o	3,920
Нижча температура згоряння палива H_H , кДж/кг	43000
Густина палива ρ_p , г/см ³	0,84
Радіус кочення колеса r_k , м	0,508
Хід поршня S_p , м	0,142
ККД трансмісії $\eta_{\text{тр}}$:	
– для спорядженого автобуса	0,79
– для автобуса з повним завантаженням	0,88
Вага автобуса G_a , Н:	
– спорядженого	119584
– з повним завантаженням	171675
Фактор обтічності kF , $\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-2}$	2,95

$$\begin{aligned} N_{1c} &= 1,7 \cdot 10^{-4} (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3); \\ N_{1п} &= 1,53 \cdot 10^{-4} (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3); \end{aligned} \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів A , B , C для автобуса Mercedes [18]:

$$A = 1,19; B = 0,038; C_c = 3,5 \cdot 10^{-3}; C_n = 3,15 \cdot 10^{-3}.$$

Значення ρ_p , kF та η_i наведені в табл. 3.

Значення i_k та ψ визначаються за формулами [18].

$$i_k = 61,1/V_a; \quad (5)$$

$$\psi = 0,8/V_a. \quad (6)$$

Після підстановки значень рівняння (2) по трьом видам шкідливих речовин для автобуса Mercedes набуває наступного вигляду.

Для спорядженого автобуса:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{CCO}} &= 0,0548 \cdot 28 \cdot 0,84 (0,05 - 1,5 \cdot 10^{-3} N_{1c} + 14 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times \\ &\quad \times [1,19 i_k + 0,038 i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3} (G_{a_c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i_c}; \\ Q'_{\text{CSH}} &= 0,0548 \cdot 128 \cdot 0,84 (0,017 + 0,31 \cdot 10^{-3} N_{1c} + 2,47 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times \\ &\quad \times [1,19 i_k + 0,038 i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3} (G_{a_c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i_c}; \end{aligned}$$

$$Q'_{c,NO_2} = 0,0548 \cdot 46 \cdot 0,84(0,02 + 2,3 \cdot 10^{-3} N_{1c} - 4 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3}(G_{a,c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i,c}. \quad (7)$$

Для автобуса з повним завантаженням:

$$\begin{aligned} Q'_{n,CO} &= 1,289(0,05 - 1,5 \cdot 10^{-3} N_{1n} + 14 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ &\times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}; \\ Q'_{n,CH} &= 5,892(0,017 + 0,31 \cdot 10^{-3} N_{1n} + 2,47 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ &\times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}; \\ Q'_{n,NO_2} &= 2,117(0,02 + 2,3 \cdot 10^{-3} N_{1n} - 4 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ &\times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}. \end{aligned} \quad (8)$$

2. Аналіз результатів машинного експерименту по розрахункам шкідливих викидів для автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Для оцінки впливу різних експлуатаційних факторів на величини викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса, що розглядається, визначення характеру цих залежностей і встановлення діапазону зміни значень цих показників був виконаний машинний експеримент на комп'ютері.

Результати розрахунків значень відсотка використання потужності N_1 , коефіцієнта надлишку повітря α та індикаторного ККД η_i для автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2 у спорядженому стані (С) та повною масою (П) G_a для різних швидкостей руху наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків N_1 та η_i для α автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2

V_a , км/год	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N_{1c}	16,6	17,3	18,8	21,1	24,6	29,6	36,1	44,5	55,0
N_{1n}	21,3	21,9	23,2	25,3	28,5	32,9	38,8	46,3	55,7
$\alpha = 5 - 6,3 \cdot 10^{-2} N_1 + 2,8 \cdot 10^{-4} N_1^2$									
α_c	4,03	3,99	3,92	3,79	3,62	3,38	3,09	2,75	2,38
α_n	3,79	3,76	3,69	3,58	3,44	3,23	2,98	2,68	2,36
$\eta_i = 0,43 + 3 \cdot 10^{-3} N_1 - 3,2 \cdot 10^{-5} N_1^2$									
$\eta_{i,c}$	0,471	0,472	0,475	0,479	0,485	0,491	0,496	0,500	0,498
$\eta_{i,n}$	0,480	0,481	0,483	0,486	0,489	0,495	0,498	0,500	0,498

Результати розрахунків кількості шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2 при спорядженій та повній масі залежно від швидкості руху наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Результати розрахунків викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2

V_a , км/год	ψ	i_k	Кількість шкідливих речовин, г/км					
			$G_{a,c}=119584 \text{ Н}$			$G_{a,n}=171675 \text{ Н}$		
			CO	CH	NO ₂	CO	CH	NO ₂
20	0,040	3,055	7,67	31,95	28,73	6,30	37,46	36,64
30	0,027	2,037	5,10	21,97	20,19	4,06	25,71	25,35
40	0,020	1,527	3,51	17,50	16,13	2,73	19,88	19,86
50	0,016	1,222	2,52	14,93	14,54	1,82	16,87	17,40
60	0,013	1,018	1,60	13,57	13,93	0,97	15,16	16,13
70	0,011	0,873	0,74	13,15	14,26	0,26	14,35	15,80
80	0,010	0,764	-	13,61	15,43	-	14,57	16,53
90	0,009	0,679	-	14,71	16,80	-	15,03	17,45
100	0,008	0,611	-	15,15	18,24	-	15,85	18,53

На рис. 2-4 приведені графіки залежностей викидів шкідливих речовин від швидкості.

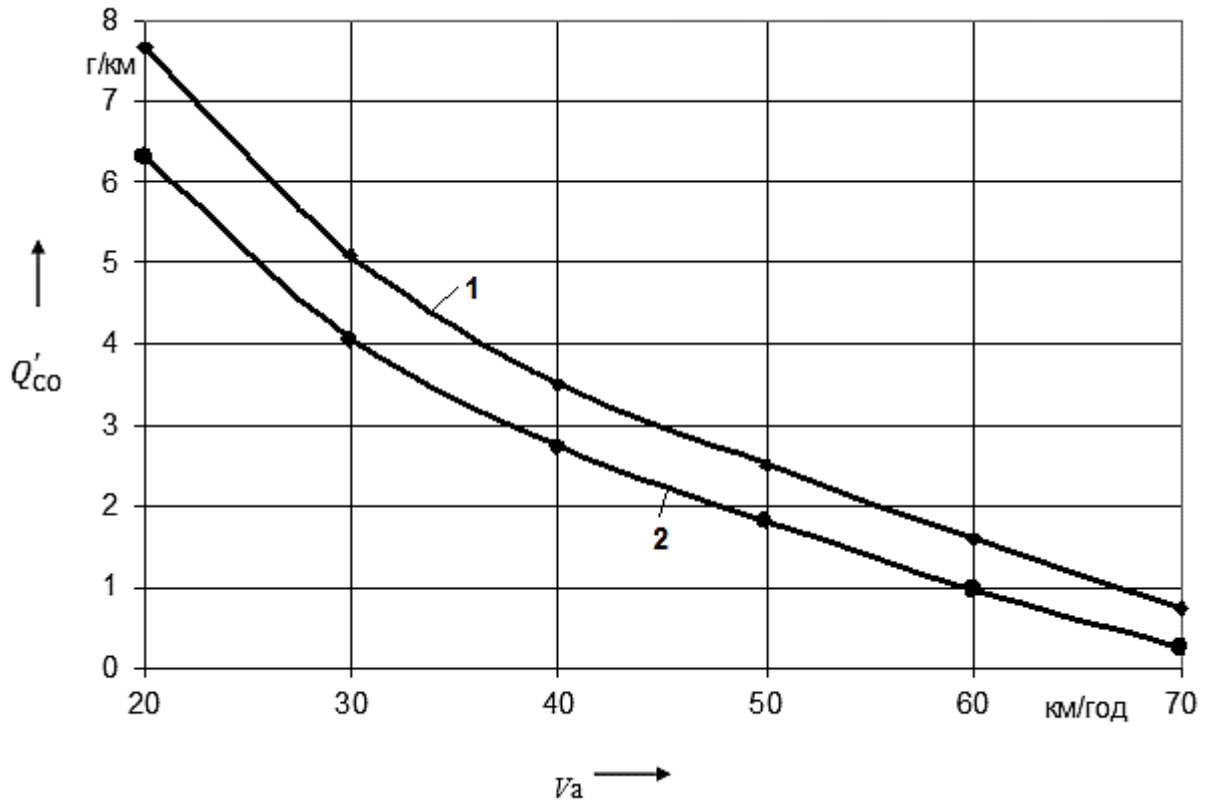


Рисунок 2 – Графік зміни викидів CO автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

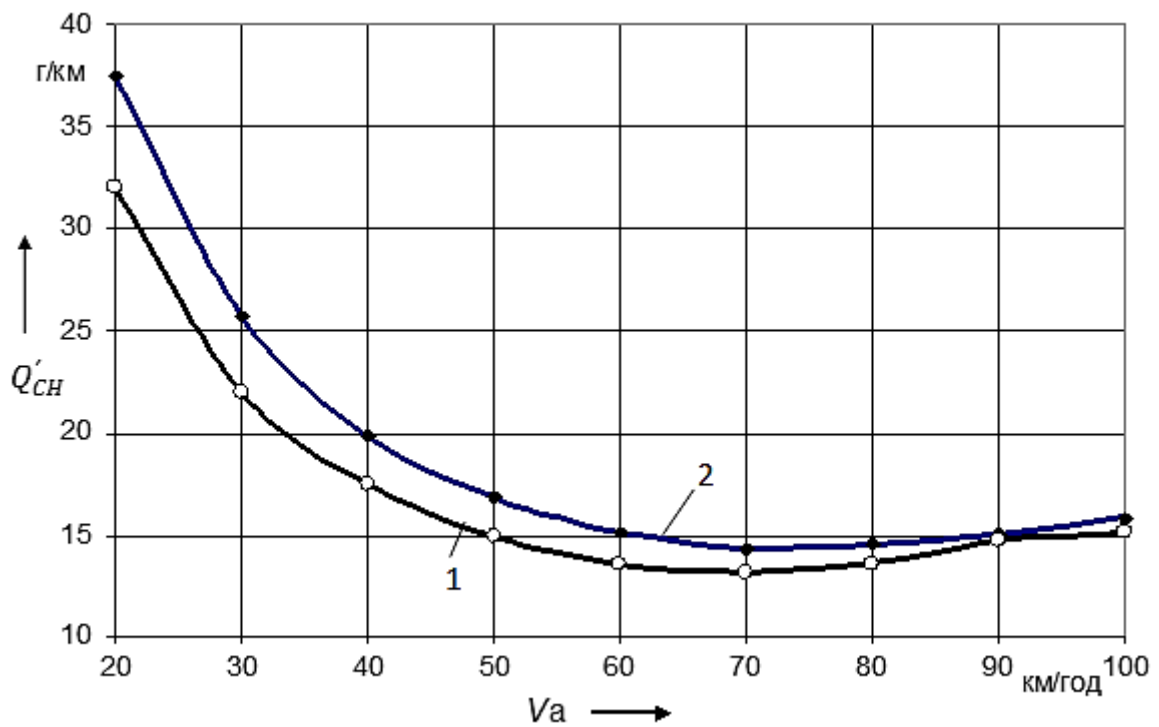


Рисунок 3 – Графік зміни викидів СН автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

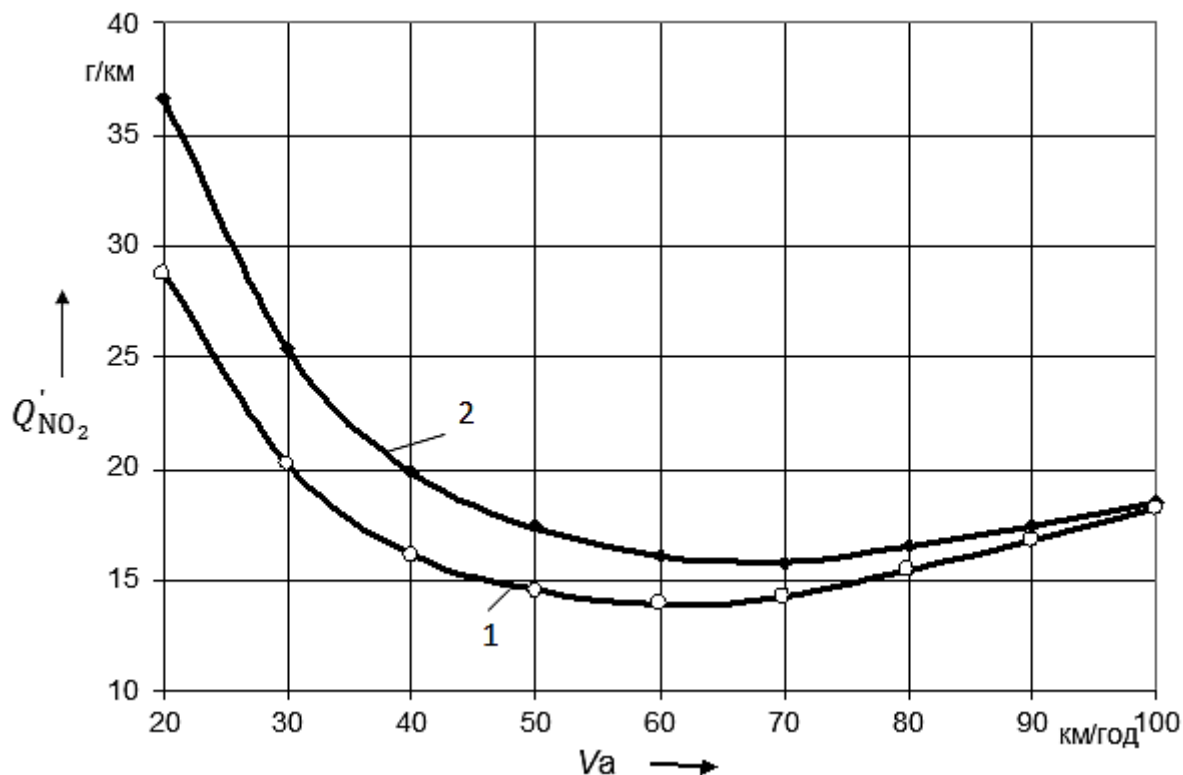


Рисунок 4 – Графік зміни викидів NO₂ автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз розрахункових даних показує, що максимальна кількість шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса, що розглядається, міститься при його русі з невеликими швидкостями (20 км/год). Зі збільшенням швидкості вміст CO у відпрацьованих газах постійно знижується (в інтервалі дослідження), а вуглеводнів CH – знижується до V_a=70 км/год (як для спорядженого автобуса, так і з повним завантаженням), а потім дещо збільшується. Вміст діоксидів азоту NO₂ також має екстремальні значення: їх мінімум у автобуса без пасажирів становить при V_a=60 км/год, а з пасажирями – при V_a=70 км/год.

Завантаження автобуса пасажирями по-різному впливає на кількість викидів шкідливих речовин. Зі збільшенням швидкості руху відношення кількості CO у автобуса у спорядженому стані та з повним завантаженням постійно збільшується: з 1,217 до 2,846 г/км (при V_a=20...70 км/год). Аналогічне ставлення до CH: збільшується з 0,853 до 0,979 г/км (при V_a=20...90 км/год).

Зміна відношення кількості NO₂ у автобуса з повним завантаженням до спорядженого стану: зі збільшенням швидкості руху воно зменшується з 1,256 до 1,037 г/км (при V_a=30...90 км/год).

Таким чином, не можна давати однакові рекомендації для автобуса для зниження токсичності з усіх видів шкідливих речовин. Наприклад, якщо зниження CO можна досягати за рахунок збільшення завантаження пасажирями та підвищення швидкості руху, то зниження NO₂ і CH забезпечується при зменшенні завантаження автобуса. Для останнього випадку швидкісний режим має певні оптимальні величини: CH – V_{a опт} = 70 км/год, NO₂ – V_{a опт} = 60 км/год для спорядженого автобуса та 70 км/год для автобуса з повним завантаженням.

ВИСНОВКИ

1. Для визначення кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами розглянутого автобуса розроблено математичні моделі за окремими компонентами, що враховують конструктивні особливості автобуса та техніко-експлуатаційні показники його роботи.

2. Результати машинного експерименту показали, що математичні моделі правильно відображають закономірності зміни вихідних параметрів роботи автобусів від різних факторів, що характеризують їхню конструкцію, умови випробувань; підтвердили необхідність розробки уточнених нормативів щодо екологічної безпеки.

3. Остаточний вибір оптимальної швидкості руху для забезпечення зниження токсичності слід проводити з урахуванням ступеня небезпеки окремих шкідливих речовин та типу двигуна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Говорущенко, М.Я., Туренко, А.М. (1999). Системотехніка транспорту (на прикладі автомобільного транспорту). Харків: ХДАДТУ, 457 с.
2. Говорущенко, М.Я. (2011). Системотехніка автомобільного транспорту (розрахункові методи досліджень): монографія. Харків: ХНАДУ, 292 с.
3. Rymaniak, Ł., Daszkiewicz, P., Merksiz, J., Kamińska, M. Methods of evaluating the exhaust emissions from driving vehicles. *Combustion Engines*. 2019, 179(4), 286-291. Doi: 10.19206/CE-2019-448. <https://surl.lu/akfbfj>.
4. Приміський, І.В., (2014). Нормування викидів відпрацьованих газів автомобілів та перехід до стандартів ЄВРО. Східноєвропейський журнал передових технологій, 4/11, 43-49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_4%2811%29_8.
5. Запас ходу електромобіля: іздові цикли CLTC, NEDC, EPA, WLTP і JC08 – який правильний? URL: <https://surl.li/qntuad>.
6. José I. Huertas, Michael Giraldo, Luis F. Quirama and Jenny Díaz. Driving Cycles Based on Fuel Consumption. *Energies* 2018, 11, 3064; doi:10.3390/en11113064. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3064>.
7. Innovative Methods of Monitoring of Diesel Engine Exhaust Toxicity in Real Urban Traffic. URL: <https://surl.lu/kmyyzzr>.
8. Klimenko, O. (2020). Dynamic variable volume sampling method for determining mass emissions of polluting substances with exhaust gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (105), 38-47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206679>.
9. Heinz Burtscher, W. Addy Majewski. Exhaust Gas Sampling and Conditioning. URL: https://dieselnet.com/tech/measure_sample.php.
10. Adam Majerczyk, Stanisław Radzimirski. (2013). Analysis of measurement errors of CVS method used for tests of pollutant emissions from light-duty vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 20, №. 4, 253-259. <https://surl.li/sjpfec>.
11. Zawiślak, M.; Molska, J.; Włostowski, R.; Włoka, A.; 'Swie'ciak, J.; Ostrowski, K. Assessment of the Actual Toxicity of Engine Exhaust Gas Emissions from Euro 3 and Euro 6 Compliant Vehicles with the BAT-CELL Method Using In Vitro Tests. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14138. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114138>.
12. Aleksandra Kęska. The Actual Toxicity of Engine Exhaust Gases Emitted from Vehicles: The Development and Perspectives of Biological and Chemical Measurement Methods. *ACS Omega* 2023, 8, 24718–24726. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02171>.
13. Aleksandra Kęska, Michał Piotrowski, Radosław Włostowski, Natalia Szymlet. Cytotoxicity assessment of exhaust gases and analysis of volatile organic compounds emitted from a diesel engine. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(9), 385–392. <https://doi.org/10.12913/22998624/207435>.
14. Kęska A, Janicka A, Zawiślak M. Numerical optimization of the BAT-CELL Bio-Ambient-Tests method for engine exhausts toxicity evaluation. *Combustion Engines*. 2023; 192(1): 19-25. <https://doi.org/10.19206/CE-147781>.
15. Markus Hallsten, (2009). Methods for Measurement and Simulation of Fuel Consumption and Emissions on Heavy Duty Vehicles. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. URL: <https://surl.li/fehvei>.
16. Kruczyński P., et al. Analysis of Selected Toxic Components in the Exhaust Gases of a CI Engine Supplied with Water-Fuel Emulsion. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 27, №. 1 (2018), 129-136. DOI: 10.15244/pjoes/74689. <https://surl.li/gynwez>.
17. Мармут, І., Шестов, С., & Чорний, І. (2024). Дослідження впливу дорожніх умов на ефективність використання автобусів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2(23), 169-179. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1539>.
18. Мармут, І.А., Кашканов, А.А., Кашканов, В.А., & Горбенко, О.С. (2023). Розробка нормативів витрат палива для міських автобусів та рекомендацій щодо ефективності їх використання. Вісник машинобудування та транспорту, 17(1), 99-107. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-99-107>.

REFERENCES

1. Govorushchenko M., Turenko A. (1999). Systemotekhnika transportu (na prykladі avtomobilnoho

- transportu). [Transport systems engineering (using the example of road transport)]. Kharkov: KhSARTU [in Ukrainian].
2. Govorushchenko M. (2011). Systemotekhnika avtomobilnoho transportu (rozrakhunkovi metody doslidzhen). [Road transport systems engineering (computational research methods)]. Monograph. Kharkov: KhNAHU [in Ukrainian].
 3. Rymaniak, Ł., Daszkiewicz, P., Merksiz, J., Kamińska, M. Methods of evaluating the exhaust emissions from driving vehicles. *Combustion Engines*. 2019, 179(4), 286-291. Doi: 10.19206/CE-2019-448. <https://surl.lu/akfbfj>.
 4. Prymiski I. (2014). Normuvannia vykydiv vidpratsovanykh haziv avtomobiliv ta perekhid do standartiv YeVRO. [Regulation of vehicle exhaust emissions and transition to EURO standards]. *Skhidnoievropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. European Journal of Enterprise Technologies*, 4/11, 43-49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_4%2811%29_8.
 5. Zapas khodu elektromobilia: yizdovi tsykly CLTC, NEDC, EPA, WLTP i JC08 – yakiy pravylnyi? [Electric vehicle range: CLTC, NEDC, EPA, WLTP and JC08 driving cycles – which one is correct?]. [in Ukrainian]. URL: <https://surl.li/qntuad>.
 6. José I. Huertas, Michael Giraldo, Luis F. Quirama and Jenny Díaz. Driving Cycles Based on Fuel Consumption. *Energies* 2018, 11, 3064; doi:10.3390/en11113064. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3064>.
 7. Innovative Methods of Monitoring of Diesel Engine Exhaust Toxicity in Real Urban Traffic. URL: <https://surl.lu/kmyyzzr>.
 8. Klimenko, O. (2020). Dynamic variable volume sampling method for determining mass emissions of polluting substances with exhaust gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (105), 38-47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206679>.
 9. Heinz Burtscher, W. Addy Majewski. Exhaust Gas Sampling and Conditioning. URL: https://dieselnet.com/tech/measure_sample.php.
 10. Adam Majerczyk, Stanisław Radzimirski. (2013). Analysis of measurement errors of CVS method used for tests of pollutant emissions from light-duty vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 20, №. 4, 253-259. <https://surl.li/sjpfec>.
 11. Zawiślak, M.; Molska, J.; Włostowski, R.; Włoka, A.; Świeściak, J.; Ostrowski, K. Assessment of the Actual Toxicity of Engine Exhaust Gas Emissions from Euro 3 and Euro 6 Compliant Vehicles with the BAT-CELL Method Using In Vitro Tests. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14138. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114138>.
 12. Aleksandra Kęska. The Actual Toxicity of Engine Exhaust Gases Emitted from Vehicles: The Development and Perspectives of Biological and Chemical Measurement Methods. *ACS Omega* 2023, 8, 24718–24726. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02171>.
 13. Aleksandra Kęska, Michał Piotrowski, Radosław Włostowski, Natalia Szymlet. Cytotoxicity assessment of exhaust gases and analysis of volatile organic compounds emitted from a diesel engine. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(9), 385–392. <https://doi.org/10.12913/22998624/207435>.
 14. Kęska A, Janicka A, Zawiślak M. Numerical optimization of the BAT-CELL Bio-Ambient-Tests method for engine exhausts toxicity evaluation. *Combustion Engines*. 2023; 192(1): 19-25. <https://doi.org/10.19206/CE-147781>.
 15. Markus Hallsten, (2009). Methods for Measurement and Simulation of Fuel Consumption and Emissions on Heavy Duty Vehicles. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. URL: <https://surl.li/fehvei>.
 16. Kruczyński P., et al. Analysis of Selected Toxic Components in the Exhaust Gases of a CI Engine Supplied with Water-Fuel Emulsion. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 27, №. 1 (2018), 129-136. DOI: 10.15244/pjoes/74689. <https://surl.li/gynwez>.
 17. Marmut, I., Shestov, S., & Chorny, I. (2024). Doslidzhennia vplyvu dorozhnikh umov na efektyvnist vykorystannia avtobusiv. [Study of the influence of road conditions on the efficiency of bus use]. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti. Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 2(23), 169-179. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1539>.
 18. Marmut, I, Kashkanov, A., Kashkanov, V., & Horbenko, O. (2023). Rozrobka normatyviv vytrat palyva dlia miskykh avtobusiv ta rekomendatsii shchodo efektyvnosti yikh vykorystannia. [Development of fuel consumption standards for city buses and recommendations regarding the efficiency of their use]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu. Bulletin of mechanical engineering and transport*, 17(1), 99-107.

[in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-99-107>.

I. Marmut, V. Bezridnyi. Mathematical models for calculating toxic emissions of a bus with a diesel engine.

An integral part of the general problem associated with improving the design of manufactured cars, maintaining them in working condition, the quality of fuel, lubricants and their economy, improving the road network and organizing the movement of transport vehicles, is their toxicity.

Many researchers have been working on issues of saving fuel and energy resources and reducing engine toxicity, and currently there are a significant number of relevant recommendations. However, simple and fairly effective proposals have yet to be developed.

The task of optimizing the operation of passenger vehicles, taking into account environmental safety, is one of the components of human regulatory activity aimed at improving the urban environment. Thus, reducing harmful emissions from car engines is the most important public and social problem.

When solving this problem, the preferred directions are those whose implementation is accompanied by savings in fuel and other material and technical resources. Known technical solutions for reducing harmful substances in engine exhaust gases are usually associated with changing their designs (this requires significant costs) or using expensive auxiliary devices to neutralize harmful substances (their installation on a car is often accompanied by a deterioration in engine efficiency). In this regard, it is advisable to primarily influence those factors that allow reducing harmful emissions from vehicles (and, accordingly, fuel consumption) during transport work.

The article develops mathematical models for calculating toxic emissions from buses with diesel engines. The results of a machine experiment on calculating harmful emissions using the example of a Mercedes-Benz O530/Citaro C2 bus are also analyzed.

One of the directions for increasing the fuel efficiency and environmental safety of buses is the practical use of rational driving modes. This allows us to consider the article aimed at increasing the efficiency of technical operation of cars by saving fuel and reducing toxicity as relevant.

Keywords: bus, operating conditions, harmful emissions, environmental safety, mathematical models, speed.

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>.

БЕЗРІДНИЙ Володимир Володимирович, старший викладач кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. М.Я. Говорущенка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: rostik405220@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4825-3213>.

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 BEZRIDNYI, senior teacher of Motor Vehicle Transport Systems Engineering Department named after M.Ya. Govorushchenka, Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: rostik405220@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4825-3213>

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1929

Мельнікова Ю.І.

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна***СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ АВТОМОБІЛЬНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ РИНКОВИХ ЗМІН: АНАЛІЗ ДІЯЛЬНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАТОРІВ**

Робота присвячена розробці стратегій управління автомобільними перевезеннями для логістичних операторів в умовах глобальних ринкових змін. Дослідження обумовлене необхідністю розробляти адаптивні стратегії управління для логістичних операторів, що забезпечують конкурентоспроможність та операційну ефективність в умовах швидкозмінного зовнішнього середовища. Метою дослідження є розробка теоретико-методичних засад та практичних рекомендацій щодо формування ефективних стратегій управління автомобільними перевезеннями логістичними операторами в умовах глобальних ринкових змін на основі комплексного аналізу їх операційної діяльності.

Методологічна основа дослідження включає систематичний аналіз наукових джерел, експертні опитування за участю фахівців галузі, статистичне моделювання та аналіз даних про результати діяльності логістичних компаній. Розроблена концептуальна модель формування стратегії відображає циклічну взаємозалежність між аналізом середовища, стратегічним вибором, реалізацією та оцінкою результатів діяльності.

Основні результати дослідження включають визначення та ранжування глобальних факторів, що впливають на діяльність логістичних операторів. За оцінками експертів, найбільший вплив мають коливання цін на паливо (9,2/10 балів) та екологічні вимоги (8,7/10 балів). Розроблено матрицю класифікації стратегій управління на основі двох ключових параметрів: рівня інноваційності та операційної ефективності. Ця матриця визначає чотири стратегічні позиції: лідери ринку, інноваційні розробки, ефективні традиціоналісти та аутсайтери.

Проведено кількісну оцінку впливу стратегічних напрямків на операційні показники ефективності. Встановлено, що AI-оптимізація маршрутів знижує собівартість перевезень на 10-15%, підвищує надійність доставки на 5-7%, а впровадження цифрових платформ підвищує надійність доставки на 3-5% і знижує витрати на 5-10%.

Авторка вдосконалила методологічні інструменти оцінки цифрової зрілості транспортних компаній та запропонували механізм постійного коригування стратегій на основі моніторингу ефективності.

Результати дослідження дозволяють логістичним операторам об'єктивно оцінити своє поточне стратегічне становище, визначити пріоритетність інвестицій у технології на основі кількісної оцінки впливу та розробити адаптивні стратегії, які стійкі до змін на міжнародних ринках.

Ключові слова: управління автомобільними перевезеннями, аналіз діяльності логістичних операторів, міжнародна транспортна логістика, стратегічне управління, цифрова трансформація, операційна ефективність транспортних процесів.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується посиленням глобалізаційних процесів, динамічними змінами ринкових умов та прискореною цифровою трансформацією бізнес-середовища. В таких умовах транспортна галузь, зокрема сектор автомобільних перевезень, відіграє ключову роль у забезпеченні функціонування міжнародних ланцюгів постачань та підтримці економічної стабільності.

Актуальність дослідження стратегій управління автомобільними перевезеннями зумовлена низкою чинників. По-перше, стрімкий розвиток цифрових технологій (штучний інтелект, Internet of Things (IoT), блокчейн) кардинально змінює традиційні підходи до організації транспортних процесів. По-друге, посилення екологічних вимог та необхідність дотримання принципів сталого розвитку вимагають перегляду існуючих операційних моделей. По-третє, глобальні кризи, такі як пандемія COVID-19 та геополітична нестабільність, продемонстрували вразливість логістичних систем та необхідність розробки адаптивних стратегій управління.

Багато науковців займалися проблемою стратегічного управління: в роботах Криворучко О. та Кривенко Л. [1] досліджували логістичні системи управління якістю автотранспортних послуг; Zhu [6] аналізував застосування штучного інтелекту в логістиці; Liao, Liu та Yuan [3] вивчали стійкість мультимодальних перевезень в постпандемічний період; Толпежніков Р. та Толпежнікова Т. [5] досліджували стратегічне управління міжнародною діяльністю логістичних підприємств.

Незважаючи на значну кількість наукових робіт, залишаються недостатньо дослідженими питання формування комплексних стратегій управління автомобільними перевезеннями, що враховують взаємозв'язок технологічних, операційних та адаптивних компонентів у контексті

глобальних ринкових змін. Існують суттєві прогалини в розумінні механізмів адаптації логістичних операторів до швидкозмінних умов зовнішнього середовища та кількісної оцінки ефективності різних стратегічних рішень.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується посиленням міжнародної торгівлі та динамічними ринковими змінами, що значною мірою впливає на транспортно-логістичний сектор. Автомобільні перевезення, будучи однією з найгнучкіших ланок логістичних ланцюгів, потребують розробки ефективних стратегій управління для забезпечення конкурентоспроможності операторів. Аналіз останніх досліджень свідчить про активний розвиток наукової думки щодо оптимізації управління перевезеннями в умовах глобалізації.

Дослідження Криворучко О. та Кривенко Л. [1] акцентують увагу на необхідності впровадження логістичних систем управління якістю, що ґрунтуються на системному та процесному підходах. Автори обґрунтовують доцільність інтеграції логістики, управління якістю та логістичного сервісу для підвищення ефективності використання ресурсів. Цей підхід є фундаментальним для формування стратегій діяльності сучасних операторів.

Важливим аспектом є вплив інфраструктурних проектів. Дослідження Praveen M., Salim K, Aghilesh, M. показало, що розвиток національних автомагістралей (наприклад, NH-66) суттєво скорочує тривалість транзиту, знижує логістичні витрати та підвищує надійність ланцюгів постачань, що безпосередньо впливає на операційну діяльність перевізників [2].

У контексті глобальних викликів, таких як пандемія COVID-19, дослідження Liao R., Liu W. і Yuan, Y. вказують на критичну потребу підвищення стійкості (resilience) мультимодальних транспортних систем. Автори пропонують використання супер-мережевих моделей для аналізу ризиків та управління ними, що актуально і для автомобільних перевезень [3].

Стратегічне управління міжнародною діяльністю логістичних підприємств, згідно з Толпежніковим Р. та Толпежніковою Т., потребує тісної інтеграції маркетингової та логістичної політик, а також контролю операційних витрат, наприклад, палива за допомогою GPS-моніторингу [5].

Не менш вагомим є внесок цифровізації, так Zhu виділяє роль штучного інтелекту в оптимізації маршрутів, автоматизації складської логістики та прогнозуванні попиту [6]. Боковець В., Давидюк Л. та Пілявоз Т. аналогічно наголошують на ключовій ролі AI, IoT та блокчейну в підвищенні ефективності міжнародної логістики [7]. Дослідження Onyshchuk V. та ін. демонструють, що застосування цифрових технологій, зокрема цифрових двійників, дозволяє знизити транспортні витрати в середньому на 18% [10].

Проте, як зазначає Козлова І., стан логістичної системи України потребує вдосконалення, про що свідчить аналіз індексу LPI [8]. Виклюк М. вказує на системні проблеми низької інвестиційної активності у транспортно-логістичній сфері, що є серйозною перешкодою для розвитку [14]. Огренич Ю. і Діброва В. дослідили проблеми логістичної діяльності українських підприємств в умовах невизначеності, виділивши такі чинники впливу, як стан транспортних мереж, нестача електроенергії та заборона пересування морем і авіаперевезень [12].

Дослідження Колодізева Т. присвячене перспективам впровадження блокчейн-технологій. Авторка визначила стратегії їх застосування на різних рівнях економіки, що дозволяє реалізувати принципи прозорості, ефективності та зниження витрат [9]. Vobrakov A. та ін. розробили універсальну модель оптимізації транспортної інфраструктури, підкреслюючи потребу в синергії професійного підходу та стратегічних пріоритетів [4].

Аналіз організаційних структур, на прикладі вітчизняного перевізника (Totska, O., Prosvirnik M.), показує, що ефективне функціонування залежить від чіткого розподілу функцій між відділами логістики та експедиції [17]. Jurek K. наголошує на безпосередньому впливі експедиторських операцій на управління транспортними процесами, що підтверджується аналізом діяльності конкретних компаній [11].

Крамський С., Дарушин О. та Захарченко О. досліджували особливості управління логістичними проектами, зокрема інтермодальними перевезеннями, використовуючи контент-аналіз та акцентуючи увагу на правилах «Інкотермс 2020» [15]. Семенда Д. та Семенда О. розглядають логістику як ключовий чинник розвитку комерційної діяльності, зазначаючи про важливість інтеграції сучасних технологій та екологічних аспектів [16]. Невертій, Г. та Золотухін, О. пропонують методіку оцінки рівня цифровізації автотранспортних підприємств, що є важливим інструментом для стратегічного планування їхньої трансформації [13].

Незважаючи на значний обсяг наукових робіт, присвячених окремим аспектам, залишається недостатньо дослідженим комплекс стратегій, що дозволить логістичним операторам ефективно адаптуватися до глобальних ринкових змін. Необхідно системно дослідити, як оператори інтегрують інноваційні технології, методи управління якістю, принципи стійкості та організаційні рішення в єдину стратегію управління автомобільними перевезеннями. Це визначає потребу в поглибленому аналізі їх операційної діяльності для виявлення ключових факторів успіху та розробки відповідних практичних рекомендацій.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка теоретико-методичних засад та практичних рекомендацій щодо формування ефективних стратегій управління автомобільними перевезеннями логістичними операторами в умовах глобальних ринкових змін на основі комплексного аналізу їх операційної діяльності.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні необхідно вирішити наступні задачі:

- систематизувати сучасні підходи до визначення сутності та змісту стратегічного управління автомобільними перевезеннями в контексті міжнародної транспортної логістики;
- визначити ключові фактори впливу глобальних ринкових змін (діджиталізації, нестабільності ланцюгів постачань, екологічних вимог) на формування операційних стратегій логістичних операторів;
- дослідити практики адаптації стратегій управління автомобільними перевезеннями провідними логістичними операторами шляхом аналізу їх операційної діяльності;
- класифікувати основні типи стратегій управління автомобільними перевезеннями, що використовуються логістичними операторами для протидії викликам глобалізації;
- обґрунтувати напрями вдосконалення механізмів стратегічного управління автомобільними перевезеннями для підвищення конкурентоспроможності вітчизняних логістичних операторів на міжнародному ринку.

Об'єктом дослідження виступає процес стратегічного управління автомобільними перевезеннями в системі міжнародної транспортної логістики.

Предметом дослідження є організаційно-економічні відносини, що виникають у процесі формування та реалізації стратегій управління автомобільними перевезеннями логістичними операторами в умовах глобальних ринкових змін.

Теоретичною основою дослідження стали праці вітчизняних і зарубіжних вчених у галузі логістики, стратегічного менеджменту та управління транспортними системами. Методологічну основу склали загальнонаукові методи пізнання, системний підхід, методи порівняльного аналізу, статистичні та економетричні методи обробки даних.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі проведеного аналізу робіт вітчизняних і зарубіжних вчених було розроблено концептуальну модель формування стратегій управління автомобільними перевезеннями в умовах глобальних ринкових змін (рис. 1).

Модель представляє спрощений цикл стратегічного управління з шістьма основними етапами:

1. Аналіз середовища - вивчення ринкових умов та можливостей підприємства.
2. Вибір стратегії - визначення одного з трьох основних напрямів: технологічна - впровадження інновацій, операційна - оптимізація процесів та адаптивна - гнучкість та реакція на зміни.
3. Реалізація - практичне впровадження обраного підходу.
4. Оцінка ефективності - моніторинг досягнення цільових показників.
5. Перевірка результатів - аналіз успішності реалізації.
6. Корекція - повернення до етапу аналізу при необхідності змін.

Запропонована модель відображає послідовний процес, що починається з аналізу зовнішніх викликів глобалізації та внутрішнього потенціалу оператора. Ключовим етапом є вибір інтегрованої стратегії, яка поєднує технологічну, операційну та адаптивну складові. Реалізація стратегії через конкретні інструменти дозволяє досягти головної мети – підвищення конкурентоспроможності та ефективності транспортних послуг. Постійний моніторинг і корегування забезпечують циклічність і гнучкість управлінського процесу.

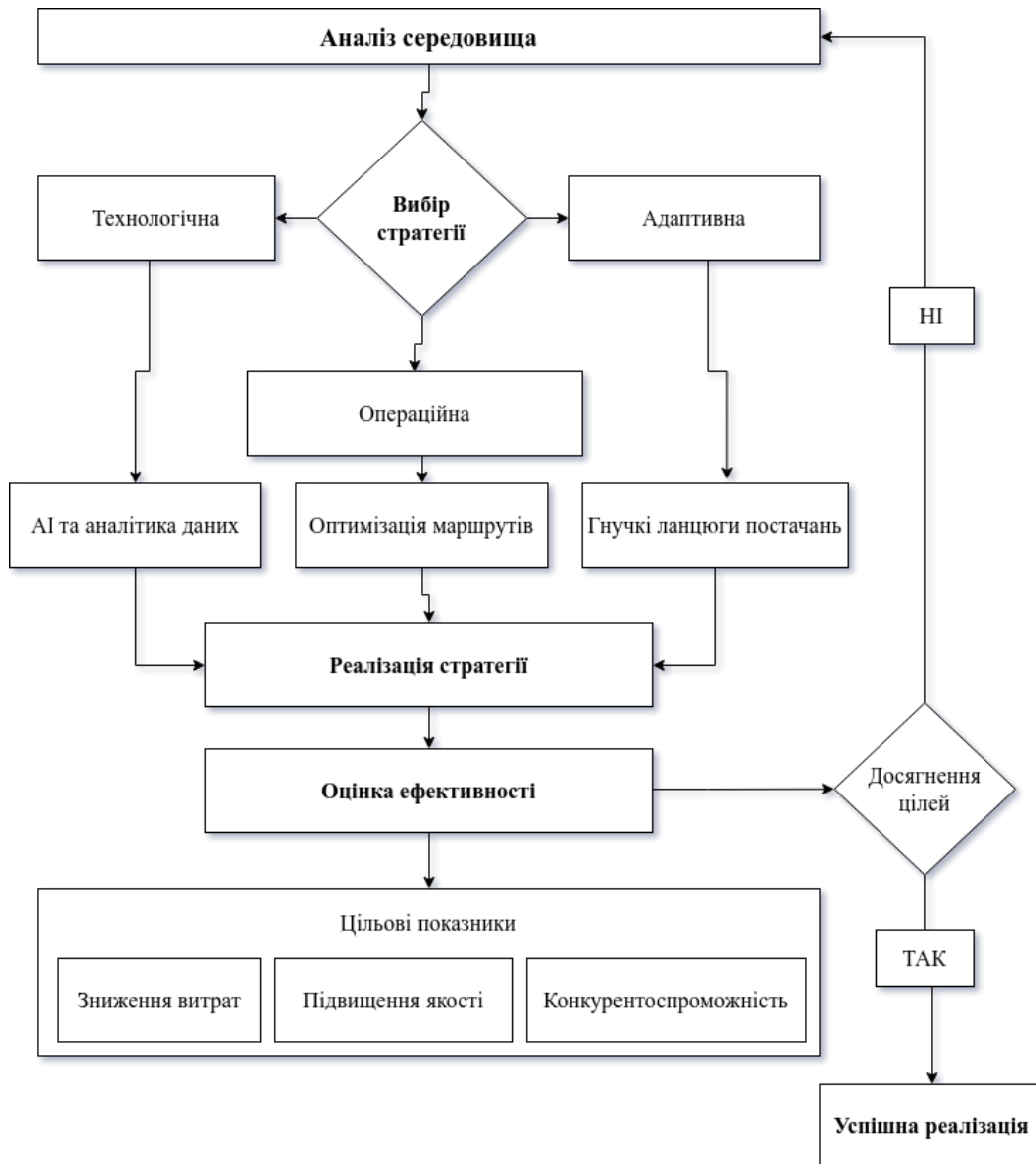


Рисунок 1 - Концептуальна модель формування стратегій управління автомобільними перевезеннями
Джерело: розроблено авторкою на основі [1, 5, 6]

Для оцінки впливу ключових глобальних чинників на операційну діяльність логістичних операторів було проведено експертне опитування. Опитування було проведено серед експертів в транспортній галузі: топ-менеджери логістичних компаній, менеджери середньої ланки, власники транспортних компаній, аналітики галузі. Критерії відбору експертів: досвід роботи в галузі – не менше 5 років; посада – керівний рівень або експертна позиція; участь у міжнародних перевезеннях. Опитування проводилось у період лютий-березень 2024 року за допомогою структурованого анкетування. Експертам пропонувалось оцінити вплив 7 ключових чинників за 10-бальною шкалою, де 1 – мінімальний вплив, 10 – максимальний вплив. Ранжування розраховувалось за середнім балом: чинник із найвищим середнім балом отримував ранг 1, чинник із наступним за величиною балом – ранг 2 і так далі до чинника з найнижчим середнім балом. Рівень відгуку склав 78% від загальної кількості запрошених експертів. Таким чином, ранг відображає ступінь важливості кожного чинника, визначений на основі середньої оцінки експертів, що забезпечує об'єктивність і репрезентативність отриманих результатів.

Цей підхід забезпечив репрезентативність результатів та дозволив отримати об'єктивну оцінку впливу глобальних чинників на операційну діяльність логістичних операторів в Україні. Результати ранжування чинників за ступенем впливу представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Вплив глобальних чинників на операційну діяльність логістичних операторів

Чинник	Середній бал впливу (за 10-бальною шкалою)	Ранг
Коливання цін на паливо та енергоносії	9.2	1
Вимоги до екологічної стійкості (зменшення вуглецевого сліду)	8.7	2
Діджиталізація та необхідність інвестування в IT-рішення	8.5	3
Нестабільність глобальних ланцюгів постачань	8.4	4
Зміни в митному та податковому регулюванні	7.9	5
Дефіцит кваліфікованих водіїв та логістичних фахівців	7.8	6
Політична нестабільність у ключових регіонах	7.5	7

Джерело: розроблено авторкою на основі експертного опитування

Дані табл. 1 демонструють, що найсильніший вплив на діяльність операторів мають економічні та екологічні чинники. Високі позиції діджиталізації та нестабільності ланцюгів постачань підтверджують необхідність формування адаптивних і технологічно орієнтованих стратегій. Ця оцінка дозволяє виявити пріоритетні напрямки управління.

За результатами аналізу діяльності провідних логістичних операторів було запропоновано їх класифікацію за двома ознаками: рівень інноваційності та орієнтація на операційну ефективність (рис. 2).



Рисунок 2 - Матриця класифікації стратегій управління автомобільними перевезеннями

Джерело: розроблено авторкою на основі [1, 5, 6]

Представлена матриця візуалізує чотири типових стратегічних позиції: «Лідери ринку», «Інноваційні розробки», «Ефективні традиціоналісти», «Аутсайтери». Найбільш перспективною та стійкою є позиція «Лідерів ринку», що поєднує високий рівень інновацій з фокусом на операційній ефективності (застосування інтегрованих технологічних рішень). «Адаптивні логістичні моделі» дозволяють швидко реагувати на зміни ринку, але потребують подальшого технологічного розвитку. Інші стратегії є найменш конкурентоспроможними в довгостроковій перспективі. Напрямами подальшого розвитку цих стратегій є: з «Аутсайдерів» до «Ефективних традиціоналістів», з «Інноваційних розробок» до «Лідерів ринку», з «Ефективних традиціоналістів» до «Лідерів ринку».

Для оцінки ефективності запропонованих стратегічних напрямів було змодельовано їх потенційний вплив на ключові операційні показники (KPI) логістичного оператора, до яких відноситься собівартість перевезень, тривалість доставки, надійність постачань і рівень екологічності.

Розрахунки були проведені за даними аналізу практик логістичних операторів, проведено опитування менеджерів з досвідом впровадження технологій, здійснена оцінка ефективності різних стратегічних рішень та аналіз успішних кейсів інтеграції AI та IoT. Результати моделювання представлені в табл. 2.

Таблиця 2 - Оцінка впливу стратегічних напрямів на операційні показники

Стратегічний напрям	Вплив на собівартість перевезення	Вплив на тривалість доставки	Вплив на надійність постачань (% виконаних замовлень вчасно)	Вплив на екологічність (зменшення викидів CO ₂)
Оптимізація маршрутів за допомогою AI	↓ 10-15%	↓ 8-12%	↑ 5-7%	↓ 5-8%
Впровадження екологічного транспорту (електромобілі)	↑ 15-20% *	–	–	↓ 25-40%
Інтеграція з платформами цифрових фрахтових ринків	↓ 5-10%	–	↑ 3-5%	↓ 2-4%
Автоматизація документообігу (блокчейн)	↓ 3-5%	↓ 2-3%	↑ 4-6%	–

Примітка: ↓ – зниження, ↑ – підвищення, – незначний вплив.

*Зростання собівартості пов'язане з капітальними витратами, що окупаються в довгостроковій перспективі.

Джерело: розроблено авторкою на основі аналізу даних операторів та моделювання

Найбільший комплексний позитивний ефект демонструють стратегії, пов'язані з оптимізацією маршрутів і автоматизацією документообігу. Впровадження електромобілів, попри значні капітальні витрати, є ключовим для досягнення цілей екологічної стійкості. Дані табл. 2 є ефективним інструментом для прийняття зважених рішень щодо інвестування в ті чи інші стратегічні ініціативи.

Таким чином, отримані результати дослідження дають змогу системно оцінити виклики, класифікувати існуючі підходи та кількісно оцінити ефективність різних стратегій управління автомобільними перевезеннями, що є теоретичною базою для розробки практичних рекомендацій для логістичних операторів.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати дозволяють поглибити розуміння сучасних підходів до стратегічного управління автомобільними перевезеннями в умовах глобальних ринкових змін. Проведене дослідження виявило низку ключових закономірностей, які потребують детального обговорення.

Результати експертного опитування (табл. 1) підтверджують гіпотезу про визначальний вплив економічних та екологічних чинників на операційну діяльність логістичних операторів. Високі позиції коливань цін на паливо (9,2 бала) та екологічних вимог (8,7 балів) узгоджуються з висновками Криворучко та Кривенко [1] щодо необхідності інтегрованого управління ресурсами. Однак, на відміну від попередніх досліджень, проведене опитування виявило значний вплив діджиталізації (8,5 балів), що відображає прискорену технологічну трансформацію галузі в постпандемічний період.

Матриця класифікації стратегій (рис. 2) демонструє переваги інтегрованих технологічних рішень, що підтверджує результати Zhu J. [6] щодо впливу штучного інтелекту на операційну ефективність. Проте проведене дослідження виявило суттєву різницю в ефективності між пілотними AI-проектами (низька ефективність) та повномасштабним впровадженням AI-оптимізації (висока ефективність). Це свідчить про необхідність критичного масштабування технологічних рішень для досягнення значного економічного ефекту.

Дані табл. 2 підтверджують висновки Onyshchuk V. та ін. [10] про потенціал цифрових технологій у зниженні транспортних витрат. Однак аналіз виявив деякі особливості, а саме, що оптимізація маршрутів за допомогою AI забезпечує найбільший комплексний ефект, впровадження електромобілів потребує довгострокової перспективи окупності, а автоматизація документообігу демонструє значний вплив на надійність доставки.

Концептуальна модель (рис. 1) розкриває циклічний характер стратегічного управління, що узгоджується з дослідженнями Толпежнікова Р. та Толпежнікової Т. [5]. Проте запропонований авторами підхід акцентує увагу на необхідності постійного моніторингу зовнішніх чинників, важливості гнучкої корекції стратегій та інтеграції технологічних та операційних компонентів.

Отримані результати мають певні обмеження, пов'язані з регіональною специфікою досліджуваних компаній, динамічним характером технологічного розвитку та впливом макрополітичних чинників на транспортну галузь.

ВИСНОВКИ

Ефективне управління автомобільними перевезеннями вимагає інтегрованого підходу, що поєднує технологічні інновації з операційною оптимізацією. Вибір стратегії повинен враховувати специфіку зовнішнього середовища та внутрішній потенціал оператора. Кількісна оцінка впливу стратегічних рішень дозволяє оптимізувати інвестиції в розвиток логістичної інфраструктури.

Основним результатами проведеного дослідження є:

1. Розробка концептуальної моделі формування стратегій управління автомобільними перевезеннями, що враховує циклічність та взаємозв'язок технологічних, операційних та адаптивних компонентів.

2. Визначення рейтингу впливу глобальних чинників на операційну діяльність, де найбільший вплив мають коливання цін на паливо (9,2/10 балів) та екологічні вимоги (8,7/10 балів).

3. Запропоновано матрицю класифікації стратегій за двома ознаками: рівень інноваційності та операційна ефективність.

4. Кількісно оцінено вплив стратегічних напрямів на операційні показники, зокрема AI-оптимізація маршрутів знижує собівартість перевезень на 10-15%.

Результати дослідження дозволяють логістичним операторам оцінити поточну стратегічну позицію та визначити напрями розвитку, визначити пріоритети інвестування в технології на основі кількісної оцінки їх впливу та розробити адаптивні стратегії, стійкі до глобальних ринкових змін.

Дослідження доводить ефективність інтегрованого підходу до управління автомобільними перевезеннями, що поєднує технологічні інновації з операційною оптимізацією. Запропоновані моделі та методики можуть бути використані логістичними операторами для підвищення конкурентоспроможності в умовах глобалізації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Криворучко О. М. Логістична система управління якістю автотранспортних послуг/ Криворучко О. М., Кривенко Л. Ф. //Економіка транспортного комплексу, 2024. – № 43, - с.168. <https://doi.org/10.30977/ЕТК.2225-2304.2024.43.168>

2. Praveen M.V. Linking Road to Logistic Progress in Kerala: An Analysis of the Influence of National Highway Development on Supply Chain and Logistics/ Praveen M.V., Salim K.C.M., Aghilesh M. // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2024. - Volume 12, Issue XI, 2024. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.65024>

3. Liao R. Resilience Improvement and Risk Management of Multimodal Transport Logistics in the Post-COVID-19 Era: / Liao R., Liu W., Yuan, Y. // The Case of TIR-Based Sea-Road Multimodal Transport Logistics. Sustainability, 2023 - Volume 15(7), 6041. <https://doi.org/10.3390/su15076041>

4. Bobrakov, A. The Role of International Transport Logistics in Optimizing Transport Infrastructure Architectures/ Bobrakov A.; Huang X.; Fei W.; Kulik M.; Ivanenko D.; Gavrylovskiy O. // AD Alta: 2024.14/01-XXXIX. p. 146-149. <https://www.magnanimitas.cz/ADALTA/140139/PDF/140139.pdf>

5. Tolpezhnikov R. Stratehichne upravlinnia mizhnarodnoiu diialnistiu lohistrychnykh pidpriumstv [Strategic management of international activities of logistics enterprises]/ Tolpezhnikov R., Tolpezhnikova T.// Visnyk Mariupolskoho derzhavnoho universytetu. Serii: Ekonomika. 2022. № 24,p. 43–49. URL: https://repository.mu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4872/1/tolp_strat_2022_24_43.pdf

6. Zhu J. Analysis on the Application of Artificial Intelligence in the Field of Logistics. Frontiers in Business// Economics and Management, 2024. №14(3), p. 66-68. <https://doi.org/10.54097/3pd01b02>

7. Боковець В. Інноваційні технології в міжнародній логістичній діяльності/ Боковець В.; Давидюк Л.; Пілявоз Т. // Innovation and Sustainability. 2024. №3, с. 204-212. <https://doi.org/10.31649/ins.2024.3.204.212>

8. Козлова І. Аналіз стану управління системою логістики в Україні. Економічний аналіз// 2022. Том 32. No 1. с. 39-46. <https://doi.org/10.35774/econa2022.01.039>

9. Колодізева Т. О. Перспективи впровадження блокчейн-технології в транспортну логістику та управління ланцюгами поставок / Т. О. Колодізева. - Бізнес-Інформ. - 2023. - №6. - С. 184–190. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-6-184-190>
10. Onyshchuk V. Digital technologies and modelling for enhancing supply chain efficiency in international road transport / Onyshchuk V.; Dubytskyi O.; Bodak V.; Pavlova I.; Riabykh N. // *Revista Gestão & Tecnologia*, - 2025 - №25(1), 168-185. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2025.v25i1.3114>
11. Jurek K. The impact of freight forwarding operations on the management of road transport processes. *SJ-economics scientific journal*.- 2025.- Issue Vol. 56 No. 1 (2025). <https://orcid.org/0000-0003-4154-6416>
12. Огренич Ю. О., Діброва В. О. Логістична діяльність підприємств в умовах невизначеності: особливості, проблеми, напрямки вдосконалення. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету*. - 2023. - № 55. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-2675/2023-55-3>
13. Невертій Г.С., Золотухін О.О. Маркетингові та управлінські аспекти цифрової трансформації підприємств транспортно-логістичної системи. *Економіка транспортного комплексу*, - 2025 - №45, 251. <https://doi.org/10.30977/ЕТК.2225-2304.2025.45.251>
14. Виклюк М.І. Аналіз інвестиційної діяльності у сфері розвитку транспортно-логістичної інфраструктури України. *Інфраструктура ринку*. - 2023. - № 72, с. 28-34. <https://doi.org/10.32782/infrastruct72-5>
15. Крамський С.О. Контент-аналіз логістичного проекту міжнародного товароруку на прикладі інтермодальних перевезень/ Крамський С.О.; Дарушин О.В.; Захарченко О.В. // *Управління розвитком складних систем*, - 2023 -№55, с. 61–68. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.61-68>
16. Семенда Д.К., Семенда О.В. Роль і значення логістики в розвитку комерційної діяльності підприємств. *Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор»*, Випуск 1 (78), 2025, с. 87-94. <https://doi.org/10.32782/business-navigator.78-15>
17. Totska, O. Організаційна структура та зовнішні взаємозв'язки міжнародного автомобільного вантажного перевізника/ Totska O.; Prosvirnikov M. // *Економіка і регіон*, - 2024- №1(92), с. 195–201. [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1\(92\).3328](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1(92).3328)

REFERENCES

1. Krivoruchko O. M. Logistichna sistema upravlinnya yakystyu avtotransportnih poslug/ Krivoruchko O. M., Krivenko L. F. // *Економіка транспортного комплексу*, 2024. - № 43, - с.168. <https://doi.org/10.30977/ЕТК.2225-2304.2024.43.168>
2. Praveen M.V. Linking Road to Logistic Progress in Kerala: An Analysis of the Influence of National Highway Development on Supply Chain and Logistics/ Praveen M.V., Salim K.C.M., Aghilesh M. // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2024. - Volume 12, Issue XI, 2024. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.65024>
3. Liao R. Resilience Improvement and Risk Management of Multimodal Transport Logistics in the Post-COVID-19 Era: / Liao R., Liu W., Yuan Y. // *The Case of TIR-Based Sea-Road Multimodal Transport Logistics. Sustainability*, 2023 - Volume 15(7), 6041. <https://doi.org/10.3390/su15076041>
4. Bobrakov A. The Role of International Transport Logistics in Optimizing Transport Infrastructure Architectures/ Bobrakov A.; Huang X.; Fei W.; Kulik M.; Ivanenko D.; Gavrylovskiy O. // *AD Alta: 2024.14/01-XXXIX*. p. 146-149. <https://www.magnanimitas.cz/ADALTA/140139/PDF/140139.pdf>
5. Tolpezhnikov R. Stratehichne upravlinnia mizhnarodnoiu diialnistiu lohistrychnykh pidpryemstv [Strategic management of international activities of logistics enterprises]/ Tolpezhnikov R., Tolpezhnikova T. // *Visnyk Mariupolskoho derzhavnoho universytetu. Serii: Ekonomika*. 2022. № 24, p. 43–49. URL: https://repository.mu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4872/1/tolp_strat_2022_24_43.pdf
6. Zhu J. Analysis on the Application of Artificial Intelligence in the Field of Logistics. *Frontiers in Business// Economics and Management*, 2024. №14(3), p. 66-68. <https://doi.org/10.54097/3pd01b02>
7. Bokovec V. Innovacijni tehnologiyi v mizhnarodnij logistichnij diyalnosti/ Bokovec V.; Davidiuk L.; Pilyavoz T. // *Innovation and Sustainability*. 2024. №3, с. 204-212. <https://doi.org/10.31649/ins.2024.3.204.212>
8. Kozlova I. Analiz stanu upravlinnya sistemoyu logistiki v Ukrayini. *Економічний аналіз*// 2022. Tom 32. No 1. с. 39-46. <https://doi.org/10.35774/econa2022.01.039>
9. Kolodizyeva T. O. Perspektivi vprovadzhennya blokchejn-tehnologiyi v transportnu logistiku ta upravlinnya lancyugami postavok / T. O. Kolodizyeva. - *Biznes-Inform*. - 2023. - №6. - С. 184–190. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-6-184-190>

10. Onyshchuk V. Digital technologies and modelling for enhancing supply chain efficiency in international road transport / Onyshchuk V.; Dubytskyi O.; Bodak V.; Pavlova I.; Riabykh N. // *Revista Gestão & Tecnologia*, - 2025 - №25(1), 168-185. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2025.v25i1.3114>
11. Jurek K. The impact of freight forwarding operations on the management of road transport processes. *SJ-economics scientific journal*.- 2025.- Issue Vol. 56 No. 1 (2025). <https://orcid.org/0000-0003-4154-6416>
12. Ogrenich Yu. O., Dibrova V. O. Logistichna diyalnist pidpriemstv v umovah nevznachenosti: osoblivosti, problemi, napryamki vdoskonalennya. *Naukovij visnik Mizhnarodnogo gumanitarnogo universitetu*. - 2023. - № 55. S. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-2675/2023-55-3>
13. Nevertij G.S.; Zolotuhin O.O. Marketingovi ta upravliniski aspekti cifrovoyi transformaciyi pidpriemstv transportno-logistichnoyi sistemi. *Ekonomika transportnogo kompleksu*, - 2025 - №45, 251. <https://doi.org/10.30977/ETK.2225-2304.2025.45.251>
14. Viklyuk M.I. Analiz investicijnoyi diyalnosti u sferi rozvitku transportno-logistichnoyi infrastrukturi Ukraini. *Infrastruktura rinku*.– 2023.- № 72, c. 28-34. <https://doi.org/10.32782/infrastruct72-5>
15. Kramskij S.O. Kontent-analiz logistichnogo projektu mizhnarodnogo tovaroruhu na prikladi intermodalnih perevezhen/ Kramskij S.O.; Darushin O.V.; Zaharchenko O.V. // *Upravlinnya rozvitkom skladnih sistem*, - 2023 -№55, s. 61–68. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.61-68>
16. Semenda D.K., Semenda O.V. Rol i znachennya logistiki v rozvitku komercijnoyi diyalnosti pidpriemstv. *Naukovo-virobnichij zhurnal «Biznes-navigator»*, Vipusk 1 (78), 2025,), s. 87-94. <https://doi.org/10.32782/business-navigator.78-15>
17. Totska O. Organizacijna struktura ta zovnishni vzayemozv'yazki mizhnarodnogo avtomobilnogo vantazhnogo pereviznika/ Totska O.; Prosvirnikov M. // *Ekonomika i region*, - 2024- №1(92), s. 195–201. [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1\(92\).3328](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.1(92).3328)

Yu. Melnikova. Strategies for managing road transportation in the context of global market changes: analysis of the activities of logistics operators

The article addresses the strategic management of road freight transportation in the context of global market transformations, digitalization, and increasing environmental requirements. The research is driven by the need for logistics operators to develop adaptive management strategies that ensure competitiveness and operational efficiency in a rapidly changing external environment. The study aims to develop theoretical and methodological foundations and practical recommendations for forming effective road freight management strategies based on a comprehensive analysis of logistics operators' activities.

The methodological basis of the research includes a systematic analysis of scientific sources, expert surveys involving industry specialists, statistical modeling, and performance data analysis from logistics companies. The conceptual model of strategy formation developed by the authors reflects the cyclical interrelationship between environmental analysis, strategic choice, implementation, and performance evaluation.

Key research results include the identification and ranking of global factors impacting logistics operators' activities. According to expert assessments, fuel price fluctuations (9.2/10 points) and environmental requirements (8.7/10 points) have the most significant impact. The authors have developed a classification matrix of management strategies based on two key parameters: innovation level and operational efficiency. This matrix identifies four strategic positions: Market Leaders, Innovative Developments, Efficient Traditionalists, and Outsiders.

A quantitative assessment of the impact of strategic directions on operational performance indicators was conducted. The research demonstrates that AI-powered route optimization reduces transportation costs by 10-15% and improves delivery reliability by 5-7%. The implementation of digital freight platforms decreases costs by 5-10%, while blockchain-based document automation reduces costs by 3-5% and improves operational reliability by 4-6%.

The author has improved the methodological tools for assessing the digital maturity of transport companies and proposed a mechanism for continuous adjustment of strategies based on performance monitoring.

The practical significance of the results is that they enable logistics operators to objectively assess their current strategic position, prioritize technology investments based on quantitative impact assessments, and develop adaptive strategies resilient to global market changes. The implemented measures allow for reducing operational costs, improving service quality, and strengthening competitiveness in international markets.

The conclusions confirm the effectiveness of the integrated approach to road freight management, which combines technological innovations with operational optimization. The proposed models and methodologies can be used by logistics operators to enhance competitiveness under globalization and by government agencies when developing transport infrastructure development programs.

Keywords: road freight management, logistics operators activity analysis, international transport logistics, strategic management, digital transformation, operational efficiency of transport processes, adaptive strategies, technological innovations.

МЕЛЬНИКОВА Юлія Ігорівна, старший викладач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: melnikova.yu.i@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

Yuliia MELNIKOVA, Senior Lecturer of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: yulaskripa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>.

Дата надходження статті до видання: 29.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1930

Москалюк М. Л., Кашканов А. А.
Вінницький національний технічний університет

УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН У ЛОГІСТИЦІ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ БАГАТОФАКТОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У статті досліджено підходи до адаптивного управління запасами запасних частин у логістиці автомобільних вантажних перевезень в умовах багатофакторної невизначеності. Враховано вплив змінного навантаження на транспортні засоби, сезонних коливань попиту, технічного стану автопарку та ризиків порушення логістичних процесів. Обґрунтовано доцільність використання цифрових технологій, зокрема телематичних систем, GPS-моніторингу та IoT-рішень, для збору та аналізу експлуатаційних даних, що дозволяє формувати динамічні профілі зношування та прогнозувати потребу в запасних частинах з високою точністю.

Запропоновано концептуальну модель адаптивного управління, яка поєднує сценарне моделювання, емпіричні коефіцієнти та алгоритми прогнозування на основі реальних даних вантажних перевезень. Розроблена модель дозволяє оперативно реагувати на зміни в інтенсивності використання транспортних засобів, оптимізувати рівень запасів, знижувати витрати на зберігання та мінімізувати ризики простоїв. Проведено порівняльний аналіз традиційних та адаптивних стратегій управління запасами, що підтверджує переваги гнучких підходів в умовах нестабільного середовища.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності технічного обслуговування автопарків, покращення планування логістичних операцій та впровадження цифрових рішень у системі управління запасами. Запропоновані моделі мають практичну цінність для транспортних компаній, що прагнуть до підвищення надійності перевезень, скорочення витрат та адаптації до сучасних викликів ринку.

Ключові слова: адаптивне управління запасами, запасні частини, автомобільні перевезення, телематика, інтернет речей (IoT), технічне обслуговування, цифрова логістика, багатофакторна невизначеність.

ВСТУП

Сучасна логістика автомобільних вантажних перевезень характеризується високою динамікою попиту, зростаючою складністю технічного обслуговування автопарків та підвищеним рівнем невизначеності зовнішнього середовища [1]. Умови експлуатації транспортних засобів змінюються залежно від сезонних факторів, типу вантажу, маршруту, стилю водіння та інтенсивності навантаження, що створює додаткові виклики для забезпечення безперервності логістичних операцій [2].

Одним із ключових елементів підтримки технічної готовності автотранспорту є ефективне управління запасами запасних частин [3]. Наявність необхідних компонентів у потрібний час і в оптимальній кількості безпосередньо впливає на рівень простоїв, продуктивність перевезень та економічну ефективність логістичних систем. Проте традиційні моделі управління запасами [4, 5], зокрема класичні економічні та регресійні підходи, часто не враховують багатофакторну природу експлуатаційних умов, що призводить до надлишкових запасів або дефіциту критичних деталей.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження адаптивних моделей управління [6], здатних реагувати на змінні параметри експлуатації в реальному часі. Такі моделі базуються на використанні цифрових технологій – телематичних систем, GPS-моніторингу, мобільних додатків та рішень на основі Інтернету речей (IoT). Збір та аналіз телематичних даних дозволяє формувати індивідуальні профілі зношування для кожного транспортного засобу, прогнозувати потребу в запасних частинах з високою точністю та оптимізувати логістичні витрати.

Запропонований у статті підхід передбачає поєднання сценарного моделювання, емпіричних коефіцієнтів та алгоритмів машинного навчання, що дозволяє адаптувати стратегії управління запасами до реальних умов вантажних перевезень. Такий підхід сприяє підвищенню надійності логістичних процесів, скороченню витрат на зберігання та зменшенню ризику простоїв, що є особливо важливим для транспортних компаній, які прагнуть до цифровізації та стійкості в умовах нестабільного ринку.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У науковій літературі управління запасами запасних частин розглядається переважно в контексті виробничих систем, сервісного обслуговування та централізованих складів (табл. 1). Класичні підходи, зокрема моделі EOQ, ABC-аналіз, регресійні методи та стохастичні алгоритми, орієнтовані на стабільні умови попиту та обмежено враховують динаміку експлуатаційного

середовища. У сфері транспортної логістики ці моделі часто не забезпечують достатньої гнучкості, особливо в умовах сезонних піків, нерівномірного навантаження на автопарк та варіативності маршрутів.

Таблиця 1 – Порівняння наукових напрямків управління запасами

Напрямок дослідження	Характеристика підходу	Переваги	Недоліки
Класичні моделі управління запасами [7]	ЕОQ, ABC, регресійні моделі; орієнтація на стабільний попит	Простота реалізації, добре досліджені, ефективні при стабільному попиті	Низька адаптивність, не враховують змінні умови експлуатації
Управління в умовах невизначеності [8]	Стохастичні моделі, fuzzy logic, сценарне моделювання	Враховування ризиків, гнучкість у плануванні	Складність математичної реалізації, потреба в експертних оцінках
Цифровізація логістики запасів [9]	ERP, GPS, мобільні додатки, хмарні платформи	Автоматизація процесів, доступ до реальних даних	Висока вартість впровадження, залежність від IT-інфраструктури
Адаптивні моделі на основі телематики [10]	ML-алгоритми, індивідуальні профілі зношування, телематичні дані	Висока точність прогнозів, персоналізація для кожного ТЗ	Потреба в великих масивах даних, складність навчання моделей
Інтеграція в логістичні системи [11]	Гібридні моделі, цифрові двійники, багаторівневе управління	Системний підхід, масштабованість, стійкість до збоїв	Висока складність інтеграції, потреба в міжсистемній сумісності
Практичні кейси в транспортній логістиці [12]	Реалізація моделей у автопарках, скорочення витрат, підвищення надійності	Доведена ефективність, орієнтація на реальні умови	Обмежена універсальність, залежність від специфіки підприємства

Як видно з таблиці 1, окремі дослідження акцентують увагу на цифровізації логістичних процесів, зокрема впровадженні телематичних систем, GPS-моніторингу та IoT-рішень для збору експлуатаційних даних. Проте більшість із них зосереджені на диспетчеризації, контролі витрат пального або оптимізації маршрутів, залишаючи поза увагою питання прогнозування потреби в запасних частинах на основі реальних параметрів зношування.

Проблема полягає в тому, що існуючі моделі не враховують багатофакторну природу ризиків, пов'язаних із технічним станом транспортних засобів [13], індивідуальними умовами експлуатації та ймовірністю порушення логістичних ланцюгів. Це призводить до неефективного планування закупівель, надлишкових запасів або дефіциту критичних компонентів, що негативно впливає на надійність перевезень.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка, обґрунтування та апробація моделі адаптивного управління запасами запасних частин у логістиці автомобільних вантажних перевезень, яка враховує експлуатаційну невизначеність, технічний стан транспортних засобів та цифрові джерела даних (телематика, IoT, GPS).

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до управління запасами запасних частин у транспортній логістиці, зокрема в умовах невизначеності та ризику.

2. Ідентифікувати ключові фактори, що впливають на потребу в запасних частинах у вантажному автотранспорті (інтенсивність експлуатації, технічний стан, сезонність, маршрутні умови).

3. Розробити концептуальну модель адаптивного управління запасами, яка інтегрує телематичні дані, GPS-моніторинг та IoT-рішення для прогнозування потреби в запасних частинах.

4. Сформувати алгоритм сценарного моделювання, що дозволяє оцінювати варіативність попиту та ризику порушення логістичних процесів.

5. Провести емпіричне дослідження на основі реальних даних вантажних перевезень для валідації запропонованої моделі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Методологія дослідження (табл. 2) базується на інтеграції системного підходу, математичних моделей, телематичних засобів моніторингу та сучасних транспортних технологій [14]. Її спрямованість акцентована на виявлення залежностей між зміною потреби в запасних частинах і зовнішніми факторами, а також на побудові адаптивної моделі планування, здатної враховувати ці взаємозв'язки.

Таблиця 2. Структура методології дослідження

Етап	Зовнішні чинники / об'єкти аналізу	Методи та інструменти	Очікувані результати
1. Визначення впливових факторів	<ul style="list-style-type: none"> - Кліматичні умови (температура, вологість, опади) - Характеристики дорожнього покриття (тип, ухили, інтенсивність трафіку) - Режими експлуатації (міські маршрути, міжміські перевезення, рівень завантаження) - Соціально-економічні ризики (кризові явища, перебої в постачанні) 	<ul style="list-style-type: none"> - Системний підхід до аналізу - Експертне оцінювання - Аналіз нормативної бази 	Складено перелік основних зовнішніх чинників, що впливають на потребу в запасних частинах
2. Типологізація запасних частин	<ul style="list-style-type: none"> - Високочутливі: гальмівні колодки, амортизатори, шини - Середньочутливі: фільтри, мастильні матеріали - Низькочутливі: електронні компоненти, кузовні елементи 	<ul style="list-style-type: none"> - Функціонально-вартісний аналіз - Класифікація за рівнем зносу 	Побудовано матрицю «чутливість до умов – пріоритетність планування»
3. Агрегація даних	<ul style="list-style-type: none"> - Телематичні показники (GPS, CAN-шина) - Геоінформаційні дані (дорожня інфраструктура, кліматичні карти) - Статистика відмов і ремонтних робіт 	<ul style="list-style-type: none"> - Онлайн-моніторинг - Геопросторовий аналіз - Інтеграція з базами даних автопарків 	Створено уніфіковану інформаційну базу для подальшого моделювання та прогнозування
4. Побудова моделей і прогнозів	<ul style="list-style-type: none"> - Взаємозв'язок між зовнішніми умовами та зносом деталей 	<ul style="list-style-type: none"> - Регресійні методи - Сценарне моделювання (міські, міжміські, гірські умови) - Прогностичні алгоритми (ARIMA, LSTM) 	Отримано прогнози потреби в запасних частинах для різних умов експлуатації
5. Формування адаптивних планів	<ul style="list-style-type: none"> - Управління запасами на складах - Закупівельна діяльність та логістика 	<ul style="list-style-type: none"> - Інтеграція з ERP-платформами [15] - Алгоритми оптимізації - Оцінка ризиків 	Забезпечено гнучке коригування планів закупівель і рівня запасів
6. Перевірка та впровадження	<ul style="list-style-type: none"> - Автопарки підприємств 	<ul style="list-style-type: none"> - Пілотні впровадження - Порівняння з традиційними підходами 	Підтверджено ефективність: зниження витрат, зменшення простоїв

Етап	Зовнішні чинники / об'єкти аналізу	Методи та інструменти	Очікувані результати
7. Очікувані результати	- Уся система управління запасами	- Комплексна ефективність моделі	Підвищено надійність перевезень, знижено витрати, забезпечено масштабованість рішення

Прогнозування потреби в запасних частинах здійснювалося на основі запропонованої обчислювальної архітектури (рис. 1), яка реалізує гібридний підхід, що поєднує класичні статистичні методи, глибокі нейронні мережі та механізми автоматичного навчання. Система побудована як багаторівнева модель, що інтегрує різні типи аналітики для підвищення точності прогнозу.

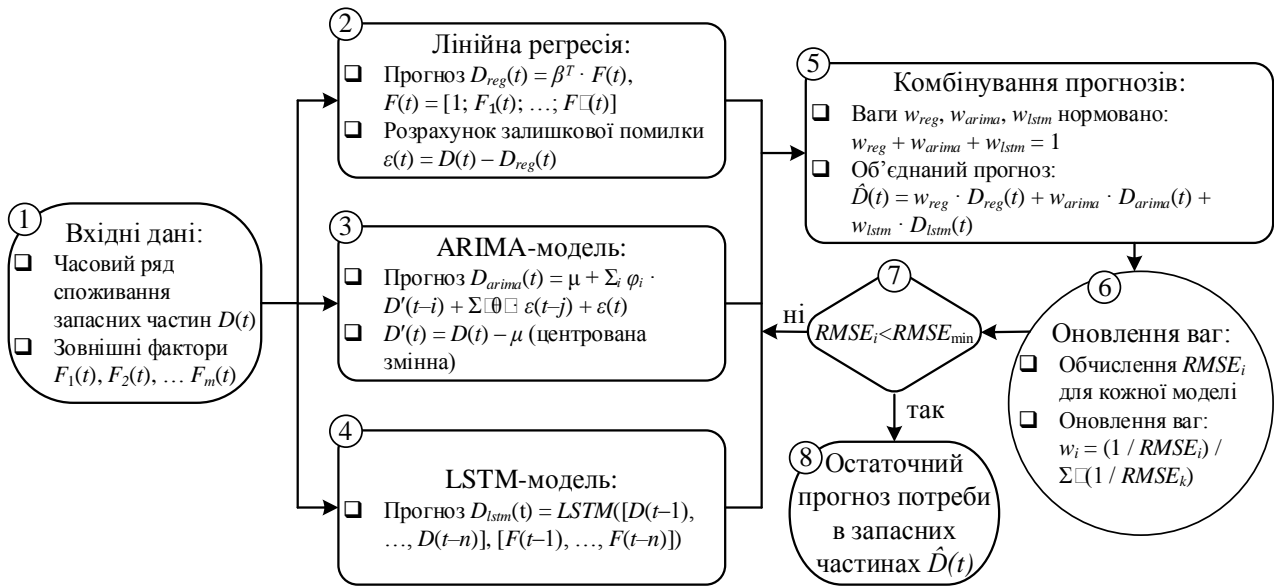


Рисунок 1. Схематична структура адаптивної системи прогнозування потреби в запасних частинах автотранспорту

На початковому етапі ① модель отримує вхідні дані: часовий ряд фактичного споживання запасних частин $D(t)$, а також набір зовнішніх змінних $F_1(t), F_2(t), \dots, F_m(t)$, які потенційно впливають на попит. Ці дані надходять до модуля лінійної регресії ②, який генерує базовий прогноз $D_{reg}(t)$ з урахуванням впливу зовнішніх факторів. Одночасно обчислюється залишкова похибка $\varepsilon(t)$, що відображає невраховані часові закономірності. На наступному етапі ③ застосовується ARIMA-модель, яка аналізує структуру залишкової похибки та формує уточнений прогноз $D_{arima}(t)$, враховуючи автокореляційні зв'язки та сезонні коливання [16]. Паралельно функціонує блок LSTM ④ – глибока рекурентна нейромережа, здатна виявляти складні нелінійні залежності між історичними даними споживання та зовнішніми змінними [17]. Вона формує третій прогноз $D_{lstm}(t)$, який доповнює результати попередніх моделей. Усі три прогнози агрегуються в окремому модулі ⑤ за допомогою зваженої формули

$$\hat{D}(t) = w_{reg} \cdot D_{reg}(t) + w_{arima} \cdot D_{arima}(t) + w_{lstm} \cdot D_{lstm}(t), \quad (1)$$

де вагові коефіцієнти w_i визначають внесок кожної моделі в інтегрований прогноз. Ці коефіцієнти є динамічними – вони автоматично оновлюються відповідно до точності кожної моделі, яка оцінюється за метрикою RMSE (Root Mean Square Error) ⑥. Чим нижча похибка, тим більша вага відповідної моделі в загальному прогнозі. У результаті формується об'єднаний прогноз $\hat{D}(t)$, який є збалансованим поєднанням лінійної, часової та нейромережевої аналітики ⑦, ⑧. Така система дозволяє враховувати зовнішні впливи, часову структуру даних та складні взаємозв'язки, а також адаптується до змін у вхідних параметрах, забезпечуючи високу точність і надійність прогнозування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі представлено результати моделювання та тестування трьох підходів до прогнозування потреби в запасних частинах для вантажного автотранспорту на основі даних реального автопарку (20 одиниць MAN TGX, період спостереження – 12 місяців).

Для збору й обробки телематичних даних застосували SKT Globus [18] – мобільний клієнт на Android, що через GPS, CAN-шину та IoT-сенсори в реальному часі передавав: пробіг і швидкість руху кожної одиниці; навантаження на вісь (датчики тиску); режими двигуна й час простоїв та інші дані. Дані SKT Globus зберігалися в хмарі та використовувалися для ідентифікації ключових факторів впливу на потребу в запасних частинах (табл. 3) при сценарному моделюванні за допомогою адаптивної моделі LSTM.

Таблиця 3. Сценарна матриця факторів впливу на потребу в запасних частинах

Фактор	Опис впливу	Варіативність	Потенційний ефект на потребу	Примітки / Джерело даних
Пробіг	Чим більший пробіг, тим вища ймовірність зношування вузлів	Висока	Зростання	Телематика (CAN, GPS)
Тип маршруту	Гірські, сільські, міські маршрути мають різний рівень навантаження	Середня	Зміна номенклатури	GPS-трекінг, логістичні карти
Сезонність	Температурні коливання впливають на зношування шин, акумуляторів тощо	Висока	Пікове навантаження	Календар, історія обслуговування
Стиль водіння	Агресивне гальмування, перевищення швидкості прискорюють зношування	Середня	Зростання	IoT-сенсори, мобільні додатки
Тип вантажу	Важкі або нестабільні вантажі створюють додаткове навантаження на підвіску	Низька	Локальне зростання	CRM, документи перевезень
Частота технічного обслуговування	Регулярне ТО знижує ризик аварійного зношування	Середня	Зменшення	ERP, сервісні журнали
Вік транспортного засобу	Старі машини мають вищу потребу в запасних частинах	Висока	Стабільне зростання	Реєстр автопарку
Кліматичні умови	Вологість, пил, перепади температур впливають на електроніку та фільтри	Середня	Зміна типу запасів	Метеодані, регіональні коефіцієнти
Інтенсивність навантаження	Частота рейсів, вага вантажу, тривалість поїздки	Висока	Прогресивне зростання	Телематика, логістичні платформи
Аварійність / інциденти	ДТП або пошкодження викликають негайну потребу в ремонті	Низька	Різне зростання	Сервісні звіти, страхові дані

Дані про використання транспортних засобів (пробіг, навантаження, сезонність) та телематичні сигнали (GPS, CAN-шина, IoT-сенсори) було розділено на навчальну (80 %) і тестову (20 %) вибірки. Точність прогнозів оцінювали за метриками MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error) та MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

У результаті моделювання було протестовано три підходи до прогнозування потреби в запасних частинах для вантажного автотранспорту:

1. Традиційна модель EOQ (Economic Order Quantity) – базується на середньому попиті та фіксованому інтервалі замовлення.

2. Регресійна модель з локальними коефіцієнтами – враховує пробіг, навантаження, сезонність та тип маршруту.

3. Адаптивна модель на основі телематичних даних та машинного навчання – використовує GPS, CAN-шину, IoT-сенсори та алгоритми прогнозування (нейронні мережі LSTM).

Результати порівняльного аналізу моделей наведено в таблиці 4.

Таблиця 4. Порівняння моделей управління запасами

Модель	Вхідні дані	AE	MSE	APE	Гнучкість	Витрати на запас	Ризик простоїв
EOQ	Середній попит, фіксований інтервал	2,4	5,7	8,2%	Низька	Висока	Високий
Регресійна модель	Пробіг, сезонність, маршрут	,1	0,3	2,7%	Середня	Середні	Середній
Адаптивна модель (ML + IoT)	GPS, CAN, телематика, історія	,6	,2	,9%	Висока	Низька	Низький

Традиційна модель EOQ показала MAE = 12,4 %, RMSE = 15,7 %, MAPE = 18,2 %. Низька гнучкість цієї моделі спричинила високі витрати на утримання запасів та значний ризик простоїв.

Регресійна модель продемонструвала MAE = 8,1 %, RMSE = 10,3 %, MAPE = 12,7 %. Середня гнучкість обумовила помірне зниження витрат на запаси й ризику порушень.

Адаптивна модель на основі телематичних даних та машинного навчання (нейронні мережі LSTM) забезпечила найвищу точність: MAE = 4,6 %, RMSE = 6,2 %, MAPE = 7,9 %. Висока гнучкість цього підходу дозволила мінімізувати витрати на зберігання та мінімізувати ризик простоїв автопарку.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати підтверджують ефективність адаптивного підходу до управління запасами запасних частин у логістиці вантажного автотранспорту. Порівняльний аналіз (табл. 4) показав, що традиційна модель EOQ, хоча й проста у реалізації, демонструє низьку точність прогнозування та високий ризик надлишкових запасів або дефіциту. Регресійна модель з локальними коефіцієнтами забезпечує кращу адаптацію до регіональних умов, однак її ефективність обмежена при високій варіативності експлуатаційних параметрів. Найвищі показники точності, гнучкості та економічності продемонструвала адаптивна модель, побудована на основі телематичних даних та алгоритмів машинного навчання. Вона дозволяє враховувати індивідуальні профілі зношування транспортних засобів, оперативно реагувати на зміну навантаження та формувати персоналізовані стратегії технічного обслуговування. Застосування IoT-сенсорів, GPS-моніторингу та мобільних платформ (зокрема SKT Globus) забезпечує безперервний збір даних і підвищує точність прогнозів. Важливо зазначити, що впровадження таких моделей потребує інтеграції з існуючими ERP-системами, підготовки персоналу та забезпечення кібербезпеки. Проте довгострокові переваги – зниження витрат, мінімізація простоїв, підвищення надійності перевезень – значно перевищують початкові інвестиції.

Впровадження адаптивної моделі управління запасами запасних частин (рис. 1) безпосередньо впливає на операційну стабільність, продуктивність і економічну ефективність вантажних перевезень:

1. Завдяки точному прогнозуванню потреби в запасних частинах на основі телематичних даних, підприємство може своєчасно забезпечити технічне обслуговування, уникнувши аварійних зупинок. Це дозволяє підтримувати високий рівень доступності транспортних засобів і виконувати графіки перевезень без порушень.

2. Модель забезпечує стабільне функціонування автопарку навіть в умовах сезонних піків, складних маршрутів або нестабільного попиту. Це особливо важливо для перевезень сільськогосподарської продукції, будівельних матеріалів або критичних вантажів, де затримки неприпустимі.

3. Зменшення аварійних ремонтів, надлишкових запасів і витрат на зберігання запасних частин сприяє загальному зниженню логістичних витрат. Це дозволяє підприємству підвищити

рентабельність перевезень і конкурентоспроможність на ринку.

4.Інтеграція моделі з телематичними платформами дає змогу оперативно коригувати маршрути, враховуючи технічний стан транспортних засобів. Це дозволяє уникати перевантаження машин, розподіляти ресурси ефективніше та знижувати ризики збоїв у доставці.

5.Модель генерує прогностичні індикатори, які можуть бути використані диспетчерами для прийняття рішень щодо заміни техніки, перенесення рейсів або оптимізації графіків. Це підвищує керованість логістичної системи в реальному часі.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено адаптивну модель управління запасами запасних частин, яка інтегрує телематичні дані, інформацію про технічний стан транспортних засобів та оцінку логістичних ризиків. Модель поєднує класичні статистичні методи з алгоритмами машинного навчання і забезпечує гнучке реагування на змінні умови експлуатації.

Проведено порівняльний аналіз трьох підходів – EOO, регресійної моделі та запропонованої адаптивної системи. Результати демонструють суттєві переваги цифрового методу в умовах невизначеності, особливо завдяки динамічній адаптації прогнозів до зовнішніх факторів. Адаптивна модель показала найвищу точність прогнозування (MAPE < 8 %), що сприяє зниженню витрат на зберігання запасів і мінімізації простоїв автопарку. Автоматичне оновлення вагових коефіцієнтів згідно з RMSE дозволяє підтримувати стабільну якість прогнозів у різних експлуатаційних сценаріях.

Запропонований підхід має практичну цінність для транспортних підприємств, які прагнуть цифровізувати технічне обслуговування і підвищити ефективність логістичних процесів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію моделі з хмарними платформами, розширення номенклатури запасних частин та адаптацію алгоритмів до різних типів транспортних засобів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Кашканов А.А., Москалюк М.Л. Невизначеність та її вплив на формування запасів запасних частин для забезпечення ефективності транспортних процесів. Вісник машинобудування та транспорту. 2024, 2, С. 74-80. <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.74>.
- 2.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.
- 3.Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. Sustainability. 2021. 13(5), 2460. <https://doi.org/10.3390/su13052460>.
- 4.Boylan J., Syntetos A. Intermittent Demand Forecasting: Context, Methods and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2021. 400 p. <https://doi.org/10.1002/9781119135289>.
- 5.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>.
- 6.Bhojani A.H., Gohel D.P. Evaluating Advancements and Identifying Research Gaps in Automotive Spare Parts Demand Forecasting. Journal of Computer Technology & Applications. 2024, 15(3), P. 47-58. URL: <https://journals.stmjournals.com/jocta/article=2024/view=177288/>.
- 7.Ghobbar A.A., Friend C.H. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. Computers & Operations Research. 2003, 30, P. 2097-2114. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00125-9).
- 8.Büyüközkan G., Çifçi G. Extending QFD with Pythagorean Fuzzy Sets for Sustainable Supply Chain Management. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A., Sari I. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making. INFUS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, vol 1029. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_17.
- 9.Kim D.-H., Kim G.-Y., Noh S. D. Digital Twin-Based Prediction and Optimization for Dynamic Supply Chain Management. Machines. 2025, 13(2), 109. <https://doi.org/10.3390/machines13020109>.
- 10.Gawande P.D. Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach. Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences. 2025, 4(7), P. 456-462. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327>.
- 11.Ivanov D., Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. Production Planning & Control. 2020, 32(9), P. 775-788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>.

12. Atakay, B. et al. Spare Parts Inventory Management System in a Service Sector Company. In: Durakbasa N.M., Gençyılmaz M.G. (eds) Digitizing Production Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90421-0_67.
13. Кашканов А. А., Біліченко В. В. Експлуатація та обслуговування транспортних машин: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2004. 136 с.
14. 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>.
15. Woźniakowski T, Jałowicki P, Zmarzłowski K. ERP systems and warehouse management by WMS. Information System in Management. 2018, 7(2). P. 141-51. <https://doi.org/10.22630/ISIM.2018.7.2.13>.
16. Sherly A., Christo M. S., Elizabeth J. V. A hybrid approach to time series forecasting: Integrating ARIMA and Prophet for improved accuracy. Results in Engineering. 2025, 27, 105703. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105703>.
17. Singh U., Saurabh K., Trehan N. et al. GA-LSTM: Performance Optimization of LSTM driven Time Series Forecasting. Computational Economics. 2025, 66, P. 2873–2908. <https://doi.org/10.1007/s10614-024-10769-0>.
18. Система моніторингу транспорту "Глобус". (2025). URL: <https://skt-globus.com.ua/>.

REFERENCES

1. Kashkanov A., Moskaliuk M. (2024). Uncertainty and its impact on the formation of spare parts inventories to ensuring the efficiency of transport processes. Journal of Mechanical Engineering and Transport, 10(2), 74-80. <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.74>
2. Kashkanov A. A., Buriak V.V., Moskaliuk M.L. (2023). Aspekty lohystychnoho zabezpechennia vyrobnychkh protsesiv pidpriemstv avtomobilnoho transportu Ukrainy. Materialy XVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu», 23-25 zhovtnia 2023 roku: zbirnyk naukovykh prats. Vinnytsia: VNTU. S. 154-156.
3. Zhang S., Huang K., Yuan Y. (2021). Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. Sustainability, 13(5), 2460. <https://doi.org/10.3390/su13052460>.
4. Boylan J., Syntetos A. (2021). Intermittent Demand Forecasting: Context, Methods and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 400 p. <https://doi.org/10.1002/9781119135289>.
5. Kashkanov A., Moskaliuk M. (2024). Methods of justification of spare parts stocks in the transport process management system. Journal of Mechanical Engineering and Transport, 10(1), 68-74. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74>.
6. Bhojani A.H., Gohel D.P. (2024). Evaluating Advancements and Identifying Research Gaps in Automotive Spare Parts Demand Forecasting. Journal of Computer Technology & Applications, 15(3), 47-58. URL: <https://journals.stmjournals.com/jocta/article=2024/view=177288/>.
7. Ghobbar A.A., Friend C.H. (2003). Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. Computers & Operations Research, 30, 2097-2114. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00125-9).
8. Büyüközkan G., Çifçi G. (2020). Extending QFD with Pythagorean Fuzzy Sets for Sustainable Supply Chain Management. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A., Sari I. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making. INFUS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1029. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_17.
9. Kim D.-H., Kim G.-Y., Noh S. D. (2025). Digital Twin-Based Prediction and Optimization for Dynamic Supply Chain Management. Machines, 13(2), 109. <https://doi.org/10.3390/machines13020109>.
10. Gawande P.D. (2025). Integrating AI-Driven Predictive Maintenance with Telematics: A Data-Centric Approach. Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Sciences, 4(7), 456-462. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862327>.
11. Ivanov D., Dolgui A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. Production Planning & Control, 32(9), 775-788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>.
12. Atakay, B. et al. (2022). Spare Parts Inventory Management System in a Service Sector Company. In: Durakbasa N.M., Gençyılmaz M.G. (eds) Digitizing Production Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90421-0_67.
13. Kashkanov A. A., Bilichenko V. V. (2004). Експлуатація та обслуговування транспортних машин: навчальний посібник. Вінниця: VNTU, 136 с.

14. Ince E.C. (2025). Mapping the Path to Sustainable Urban Mobility: A Bibliometric Analysis of Global Trends and Innovations in Transportation Research. *Sustainability*, 17(4), 1480. <https://doi.org/10.3390/su17041480>.
15. Woźniakowski T, Jałowiecki P, Zmarzłowski K. (2018). ERP systems and warehouse management by WMS. *Information System in Management*, 7(2). 141-51. <https://doi.org/10.22630/ISIM.2018.7.2.13>.
16. Sherly A., Christo M. S., Elizabeth J. V. (2025). A hybrid approach to time series forecasting: Integrating ARIMA and Prophet for improved accuracy. *Results in Engineering*, 27, 105703. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105703>.
17. Singh U., Saurabh K., Trehan N. et al. (2025). GA-LSTM: Performance Optimization of LSTM driven Time Series Forecasting. *Computational Economics*, 66, 2873–2908. <https://doi.org/10.1007/s10614-024-10769-0>.
18. Systema monitoringhu transportu "Hlobus". (2025). [Globus transport monitoring system]. URL: <https://skt-globus.com.ua/>.

M. Moskaliuk, A. Kashkanov. Spare Parts Inventory Management in Freight Transport Logistics under Multifactor Uncertainty

This article investigates approaches to adaptive spare parts inventory management in the context of freight transport logistics under conditions of multifactor uncertainty. The study accounts for the influence of variable vehicle loads, seasonal demand fluctuations, fleet technical condition, and risks of disruption in logistics processes. The use of digital technologies – particularly telematics systems, GPS monitoring, and Internet of Things (IoT) solutions – is substantiated for collecting and analysing operational data. This enables the formation of dynamic wear profiles and highly accurate forecasting of spare parts demand.

A conceptual adaptive inventory management model is proposed, integrating scenario modelling, empirical coefficients, and predictive algorithms based on real-world freight transport data. The developed model enables timely responses to changes in vehicle utilisation intensity, optimises inventory levels, reduces storage costs, and minimises downtime risks. A comparative analysis of traditional and adaptive inventory strategies confirms the advantages of flexible approaches in unstable environments.

The research findings can be applied to improve fleet maintenance efficiency, enhance logistics planning, and support the implementation of digital solutions in inventory management systems. The proposed models offer practical value for transport companies seeking to improve delivery reliability, reduce costs, and adapt to contemporary market challenges.

Key words: adaptive inventory management, spare parts, freight transport, telematics, Internet of Things (IoT), maintenance, digital logistics.

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>

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>

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>

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>

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1931

УДК 625.06/08(031)
UDK 625.06/08(031)

Пузир Р.Г., Савелов Д.В., Качмар Р.Я., Дмитрів І.В., Козлов Р.Р., Єрух Є.І.
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИХЛОПНОЇ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛІВ

Показано, що вихлопна система транспортного засобу руйнується під впливом корозії та механічних навантажень. Особливо схильні до пошкоджень любого типу зони з'єднання перехідних діаметрів, які виконані зварюванням або поєднанні з натягом. Для підвищення зносостійкості та міжремонтного періоду компонентів необхідно збільшувати товщину стінок складових механізму вихлопу. Але це призводить до зростання ваги агрегатів та маси автомобіля, що не бажано. У статті запропонований спосіб виготовлення та ремонту з'єднувальних патрубків вихлопної системи шляхом отримання розтрубів з мінімальним потоншенням торця готового виробу. Розроблені загальні рекомендації щодо проектування технологічного процесу виготовлення та ремонту таких елементів. Складність та тривалість підготовки виробництва та ремонту, а також відносна висока вартість штампного обладнання вимагають ретельної розробки технологічних процесів та обґрунтованого вибору технічно раціонального та економічно найбільш ефективного варіанту технологічного процесу, який відповідає даному типу виробництва. Навіть невеликі наступні зміни технологічних процесів зазвичай призводять до перероблення штампів або до проектування та виготовлення нових, що вимагає значного часу та коштів. Також запропоновані коефіцієнти роздавання для двох матеріалів трубчатих заготовок сталі 12X18H10T та алюмінію АД1, рекомендовані змашувальні речовини, які зменшують коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом в осередку пластичної деформації. Запропонований спосіб роздавання несиметричним інструментом дозволяє збільшити товщину крайової частини у порівнянні з класичним роздаванням за рахунок появи дотичних напружень, які розвантажують осередок деформації. За рахунок такого розвантаження тангенціальні нормальні напруження, що розтягують, зменшуються по модулю, що призводить до збільшення товщини готового виробу.

Ключові слова: вихлопна система, ремонт, виготовлення, автомобіль, пластична деформація, розтруб, роздавання.

ВСТУП

Вихлопна система транспортних засобів являє собою сукупність агрегатів, які з'єднані з двигуном магістральними металевими патрубками. З'єднання можуть бути фланцеві та суцільні. Суцільні з'єднання нероз'ємні, в основному, зварні, які утворюються між трубками різного діаметру [1]. Для отримання суцільного зварного з'єднання труб різного діаметру необхідно створити методами холодної обробки тиском на трубі меншого діаметру розтруб (перехідну конусну поверхню), а потім проводити зварювальні операції [2].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В процесі експлуатації транспортних засобів відбувається руйнування зварних з'єднань та компонентів вихлопної системи в загалом. Більшість сучасних автомобілів обладнано бензиновими або дизельними двигунами внутрішнього згоряння. Функціонування таких двигунів засноване на стисканні та згорянні палива вибухом, що створює вибуховий фронт, високу температуру, утворення великої кількості продуктів згоряння, які відводяться у випускний колектор та далі у атмосферу. Робота вихлопних елементів заснована на відведенні відпрацьованих газів, зниженні шуму, очищенні газів та корекції роботи двигуна. Через постійний вплив високих температур, агресивних хімічних речовин і механічних навантажень, різні компоненти цієї системи схильні до зношування та пошкоджень. Сукупність різних видів навантажень визначає вкрай важкі умови роботи кожного елемента системи. Тому актуальним залишається завдання рівної міцності, стійкості та надійності всіх компонентів та з'єднувальних патрубків, які сполучають ці частини.

Аналіз літературних джерел показав, що питанню причин зносу елементів вихлопної частини автомобіля приділено багато уваги. Так Т. Šolić та інші [3] з'ясували, що превалюючий знос компонентів вихлопу автомобіля відбувається з-за хімічної корозії. Найбільше пошкодження пов'язано із глушником, де накопичуються частки сажі та конденсат. Також корозія часто виникає на трубках у місцях зварних з'єднань. Зварний шов вважається найслабшою частиною структури і зазвичай першим страждає від корозії [4]. Іншою поширеною причиною несправностей є трубні з'єднання, виконані без зварювання, де недостатня стійкість з'єднання призводить до витоків вихлопних газів та, як наслідок, до розвитку механізмів корозійного руйнування [5]. Інші дослідники ще більше

заглиблюються у проблеми зносостійкості елементів вихлопної системи, де виділяють різні механізми руйнування, які обмежують термін служби агрегатів. Так, у дослідженні [6] класифіковані різні види корозії, які виникають в процесі експлуатації. Це високотемпературна, волога та сольова корозія, а також хімічні реакції між матеріалом та компонентами вихлопної суміші.

Дослідження [7, 8] на основі факторів руйнування ключових елементів вихлопної ланки (механічне руйнування при підвищеній температурі, корозійне розтріскування, міжкристалічна корозія) пропонують вибирати відповідні матеріали, виходячи з критеріїв маси, вартості, термічної (понад 800°C для колектора та понад 400°C для інших частин) та високої корозійної стійкості. Найбільш пристосованими матеріалами виявилися феритна нержавіюча сталь марок AISI 409, AISI 439, аустенітна нержавіюча сталь марок AISI 304, AISI 316, AISI 316Ti та алюмінізована сталь.

Зважаючи на існуючі результати досліджень, очевидним стає розуміння ролі товщини стінки елементів вихлопної системи та з'єднувальних патрубків у продовженні строку експлуатації. З одного боку виявляється, що складові вихлопу з більшою товщиною ребер та стінок краще протистоять корозії та механічним пошкодженням, з іншого – збільшується маса кожного компоненту, що збільшує вагу транспортного засобу в цілому. Також ослабленими зонами вважаються міста з'єднань труб з складовими механізмів вихлопу та між собою. Маються на увазі зварні з'єднання та стики з натягом [9].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тому, виходячи з вище викладеного, метою роботи було формування рекомендацій щодо процесу виготовлення та ремонту патрубків вихлопної системи транспортного засобу з підвищеною товщиною стінки розтруба. Для цього були поставлені та вирішені наступні завдання: а) розробка загальних рекомендацій до проектування технологічного процесу виготовлення та ремонту з'єднувальних елементів; б) розробка рекомендацій щодо ступені роздавання циліндричних заготовок та для використання мастильних матеріалів; в) конструювання геометричних характеристик пропонованого деформуючого інструменту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Труби механізму вихлопу автомобіля з'єднують між собою працюючі агрегати: випускний колектор, гофру, каталітичний нейтралізатор, резонатор, глушник та лямбда-зонд. Діаметр зон стику цих складових та поєднувальних труб не завжди співпадає. Тому для отримання надійного контакту діаметр патрубків розширюють на торцях (рис. 1). Для цього застосовується операції холодної обробки тиском, такі як роздавання та обкочування роликками. Обкочування роликками використовують для ремонту на СТО, роздавання – для виготовлення. Або комбінують ці способи для отримання виробу мінімальної собівартості.



Рисунок 1. Місце перехідного діаметру на з'єднувальному патрубку вихлопної системи автомобіля Mercedes W203 та S203.

Як показує практика, під час роздавання труби торцева її частина, яка збільшується у діаметрі, потоншується. Зменшення товщини стінки залежить від коефіцієнта роздавання та умов тертя між заготовкою та інструментом. З точки зору експлуатаційної стійкості такі зони трубопроводів

зменшують надійність з'єднань та строк їх роботи. У роботі [10] представлено спосіб отримання розтрубу на трубній заготовці, де товщина торцевої частини збільшена на 22,5% у порівнянні з деформацією за класичною схемою. Приводяться чисельні розрахунки та схеми формоутворення. Але не надано рекомендацій технологічного характеру щодо організації технічної підготовки та реалізації способу в умовах діючого виробництва та СТО.

Технологічний процес роздавання трубної заготовки несиметричним інструментом проектується на основі діючих технологічних процесів на виробництві за класичними схемами. Основною відмінністю під час проектування буде розділення однієї операції на два переходи зі зміною інструменту. З точки зору технологічності конструкції поява додаткового переходу та інструменту зменшує технологічність деталі в умовах багатосерійного та масового виробництва. Але збільшення товщини торця заготовки може призвести до економії матеріалу, що в цілому спричинить загальну економічність процесу.

Аналіз собівартості відштампованих деталей показав, що економія матеріалу на 10% еквівалентна збільшенню продуктивності праці у 3 рази на всіх операціях [11]. А економія металу на 20-25% не тільки у рази підвищує технологічність конструкції деталі, а й призводить до того, що вартість металу, який зекономлений, зазвичай перевищує суму прямої заробітної плати [12].

Під час побудови технологічного процесу роздавання вирішують основні технологічні питання: встановлюється характер, кількість, послідовність та сумісність операцій. До основних операцій роздавання належать такі: нарізання трубного прокату на мірні заготовки, зачищення заусенцю та пластична деформація крайових зон з однієї або двох сторін. Кількість операцій залежить від допустимого для даного металу коефіцієнту роздавання, який розраховується на стадії проектування технологічного процесу. Якщо під час розрахунків виявляється, що за одну операцію не можливо отримати задану конфігурацію деталі, то проектується друга операція з рівномірним розподілом степені деформації між ними. Між операціями вводиться проміжний відпал.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені у роботі [13], дозволяють рекомендувати збільшити коефіцієнт роздавання для матеріалу заготовок зі сталі 12X18H10T та технічного алюмінію АД1. Степінь роздавання може бути збільшена також і для інших металів та сплавів, але для цього необхідно проводити додаткові дослідження безпосередньо на виробництві під час пробних переходів. Рекомендовані коефіцієнти роздавання подані у таблиці 1 [14].

Таблиця 1. Коефіцієнти роздавання

Матеріал	АД1	12X18H10T
Значення K_p для класичного способу	1,4...1,35	1,47...1,35
Значення K_p для асиметричного способу	1,5...1,4	1,55...1,48

Якщо під час роздавання кінців труб необхідно забезпечити збільшення товщини стінки конічної частини, то коефіцієнти роздавання вибирають з довідкових даних для класичних схем.

Важливим етапом проектування технологічного процесу є вибір змащувальної рідини. Мاستило зменшує тертя між пуансоном та заготовкою та поліпшує умови деформування. При цьому знижується загальне навантаження на недеформовану частину заготовки, що за граничними коефіцієнтами роздавання буде сприяти стійкості цієї зони. Однак, у тангенціальному напрямку покращення умов тертя не завжди сприяє позитивному ефекту. Річ у тому, що зменшення коефіцієнту тертя може привести до втрати стійкості у вигляді появи гофрів на конічній частині заготовки за рахунок зниження щеплення з інструментом [15]. Особливо цей ефект притаманний як раз деталям зі зварним швом, де хвилеподібно змінюється межа пластичності та міцності матеріалу. Тут може проявлятися локалізація деформацій у послабленій зоні термічного впливу, що значно стоншує товщину металу цих міст та може призвести до появи тріщини у меридіональному напрямку. Тому у таких випадках рекомендовано підбирати таку мастильну рідину, яка б забезпечувала не рідинний режим тертя, а граничний, або напівсухий [16]. Рекомендовані змащувальні рідини подані у таблиці 2 [17].

Таблиця 2. Мастильні матеріали для процесу роздавання трубних заготовок

Матеріал	Тип труби	В'язкість Па·с	Мастило, що рекомендується
Сталі вуглецеві: Ст.1, Ст.2, Ст.3, 10, 15, 20, 30	Труби електрозварні, водогазопровідні, безшовні гаряче деформовані	1,2- 1,3·10 ²	Солідол, консталін синтетичний, ЯНЗ-2, ЛЗ-31
Корозійностійкі та Жаростійкі сталі: 10X17H13M2T, 12X18H10T і 20X23H18, 12X13, 12X17	Труби безшовні круглі (харчові та технічні)	1,6-12·10 ²	ЦИАТИМ-202 ЦИАТИМ-203
Мідь М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р	Водопровідні труби	0,8-6,0	20% каніфолі в касторовому мастилі
Латунь Л62, Л63, Л68, ЛС 59	Труби цільно тягнуті	1,5-10,0	Теж саме
Алюмінієві сплави А, АД, АД1, АМц	Труби цільно тягнуті	0,2-0,8	МС-14, МС20, турбінні та циліндрові мастила

Складність та тривалість підготовки виробництва, а також відносна висока вартість штампового обладнання вимагають ретельної розробки технологічних процесів та обґрунтованого вибору технічно раціонального та економічно найбільш ефективного варіанту технологічного процесу, який відповідає даному типу виробництва. Навіть невеликі наступні зміни технологічних процесів зазвичай призводять до переробленню штампів або до проектуванню та виготовленню нових, що вимагає значного часу та коштів.

Рекомендовано наступні етапи у розробці технологічних переходів роздавання та ремонту вихлопної системи:

1. Аналіз технологічності форми та конструктивних елементів деталі.
2. Визначення форми та розмірів заготовки, а також витрати матеріалу при найкращому його використанні.
3. Розробка найбільш раціонального технологічного процесу.
4. Встановлення типу, потужності та габаритів обладнання.
5. Відшукання типу та технологічної схеми штампу.
6. Визначення трудомісткості виготовлення деталей, що роздаються, а також кількості та розряду робочих на виробництві.

Під час розробки технологічних процесів роздавання повинні бути виконані наступні технологічні завдання: а) раціональне розкроювання матеріалу та визначення найменших розмірів заготовок; б) встановлення кількості та послідовності операцій; в) вибір ступеня складності операцій; г) встановлення кількості деталей, які одночасно роздаються; д) визначення операційних розмірів та операційних допусків.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класична технологія роздавання розтрубів на циліндричних заготовках реалізує схему вісесиметричної пластичної деформації, яка створює умови для рівномірного потоншення стінки заготовки від недеформованої частини до її торця. Роздавання несиметричним інструментом дозволяє збільшити товщину крайової частини у порівнянні з класичним роздаванням за рахунок появи дотичних напружень, які розвантажують осередок деформації. За рахунок такого розвантаження тангенціальні нормальні напруження, що розтягують, зменшуються по модулю, що призводить до збільшення товщини готового виробу. Ще одним позитивним моментом є те, що падіння рівня тангенціальних напружень зменшує навантаження на зварний шов під час пластичної деформації, як наслідок, зниження браку, за рахунок руйнування зварного шву. У роботі [18] отримано рівняння для розрахунку величини тангенціальних напружень в осередку деформації під час асиметричного роздавання розтрубу на циліндричній заготовці:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \left(1 - \frac{R_u^2}{2\rho^2} \left(\frac{\cos\theta}{\sin\alpha} + \frac{2}{3} \sin\theta \right) - \frac{R_u}{2\rho} \frac{\cos\theta}{\sin\alpha} \right), \quad (1)$$

де σ_s – межа текучості металу заготовки;
 R_u – радіус інструменту;
 ρ – поточна радіальна координата;
 θ – кут, який визначає положення меридіану;
 α – кут нахилу утворюючої пуансону.

Третій складовий виразу у дужках характеризує вплив дотичних напружень, які виникають за рахунок несиметричності осередку деформації. Виходячи з формули, можна зрозуміти, що найбільші за модулем дотичні напруження діють у зоні передачі зусилля, але в загальному зменшують тангенціальні.

Деформуючим інструментом під час роздавання є пуансон. Заготовка встановлюється вертикально на стіл пресу, затискається клиновими затискачами та роздається з робочим ходом траверси пресу. Зі зворотнім ходом траверси пуансон виходить із контакту з напівфабрикатом, зупиняється та заготовка переставляється.

Форма несиметричного пуансону у плані, робота якого досліджувалася, представлена на рис. 2 (а). Такий інструмент створює найбільш сприятливі умови для створення несиметричного осередку деформації. Різкий перепад діаметрів циліндричної та конічної частини сприяє виникненню дотичних напружень достатньої величини для розвантаження осередку пластичної деформації від дії розтягуючих тангенціальних зусиль. Але недоліком такої конструкції пуансону є гостра кромка на з'єднанні більшого напівкола з меншим. Це спричиняє концентрацію напружень та може привести до локалізації деформації та руйнуванню заготовки. Рекомендуються надавати цій зоні закруглення з максимально допустимим радіусом. Рекомендовано $R_{\min}=5 - 8$ мм для $k=1,4$, що виходить з експериментальних та чисельних експериментів, коли рівень напружень у цій зоні зменшується та дорівнює величині напружень для усього осередку деформації.

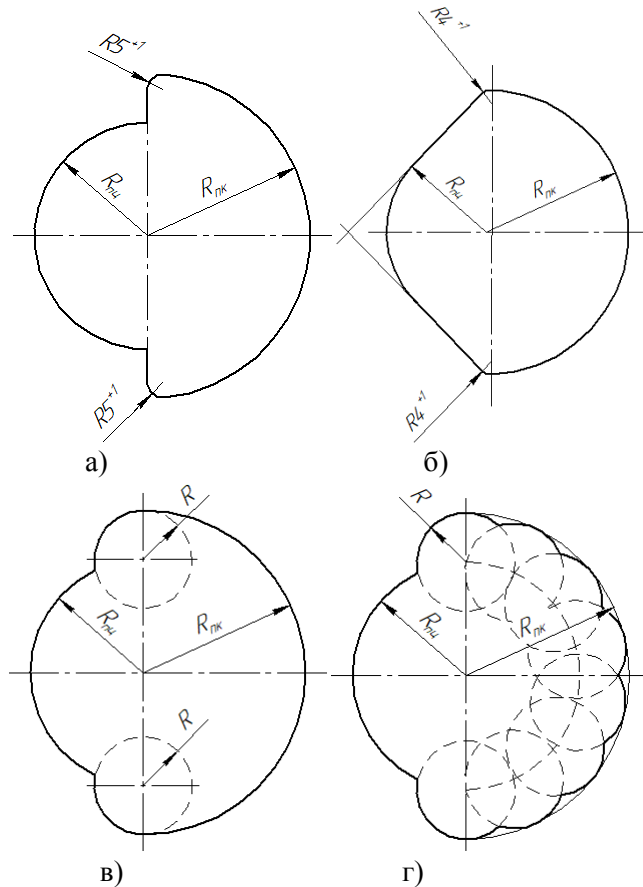


Рисунок 2. Конструкції пуансонів для формування несиметричного осередку деформації: а – з закругленням перехідної кромки; б – з перехідним конусом; в – зі сполученням колами; г – з конусною хвилеподібною поверхнею.

Деформуючий інструмент, зображений на рис. 2 (б) являє собою напівконічний пуансон. Більше напівколо з'єднане з меншим за допомогою дотичних прямих до меншого напівкола, що утворює перехідну конічну поверхню. Така форма у плані буде сприяти більш рівномірному розподілу деформацій по товщині заготовки. Цьому допомагає плавний перехід від зони більшого діаметру до меншого. Гострі кромки притуплюються під час виготовлення. Така будова пуансону використовується для отримання більшого коефіцієнту роздавання у порівнянні з класичними схемами. Використання інструменту запропонованої конструкції збільшить навантаження на перехідну зону за рахунок появи сил тертя по боковим прямолінійним стінкам, але при цьому зменшиться концентрація напружень у зоні переходу діаметрів.

Проекція у плані пуансону, зображеного на рис. 2 (в), являє собою з'єднання двох його половин за допомогою твірної кола, радіус якого дорівнює різниці радіусів більшого та меншого напівкіл. Така будова дозволяє зменшити концентрацію напружень у перехідній зоні та збільшити асиметричність інструменту. Так як у пластичну деформацію втягується більше матеріалу заготовки (у порівнянні з першим варіантом), то зусилля деформування теж буде рости. Тому під час роздавання за критичними коефіцієнтами роздавання може виникнути втрата стійкості недеформованої частини. З цієї точки зору рекомендовані коефіцієнти роздавання (табл. 1) необхідно зменшувати на 10 – 15%.

Пуансон, представлений на рис. 2 (г) відрізняється від попереднього наявністю хвилеподібної поверхні, яка утворена твірними кіл радіусом R , який дорівнює перепаду розмірів між конусною та циліндричною поверхнею. Центри цих кіл знаходяться на утворюючій циліндричної поверхні. Особливістю такої конструкції є конічна поверхня пуансону зі зменшеною площею дотику між інструментом та заготовкою, як у тангенціальному, так і в меридіональному напрямку. Це зменшує сили тертя та загальне зусилля деформування, що в загальному позитивно впливає на умови технологічного процесу пластичної деформації. Під час роздавання таким інструментом у тангенціальному напрямку виникає різномірний напружено-деформований стан. Конусна частина пуансону в загальному збільшує початковий діаметр циліндру і на цій ділянці виникають тангенціальні напруження, що розтягують. В свою чергу частини заготовки, які не контактують з інструментом (зони западин) намагаються повернути собі початкову форму та заповнюють западини. Ці зони знаходяться під впливом не тільки розтягуючих, а ще й стискаючих нормальних тангенціальних напружень. Такий розподіл напружень збільшує товщину стінки цих зон. Розвантаження осередку деформації за рахунок дотичних напружень також збільшує товщину стінок на торці для всієї зони деформування. Після калібруючого переходу метал заготовки перерозподіляється по товщині між зонами западин та виступів, що в цілому зменшує негативну радіальну складову деформації по всьому торцю. В меридіональному напрямку також зменшується навантаження на зону передачі зусилля за рахунок зменшення сил тертя, що підвищує стійкість недеформованої частини.

ВИСНОВКИ

Таким чином, сформовані рекомендації до проектування технологічного процесу роздавання несиметричним пуансоном, основними з яких є: раціональне розкроювання матеріалу та визначення найменших розмірів заготовок; встановлення кількості та послідовності операцій та переходів; вибір ступеня складності операцій; встановлення кількості деталей, які одночасно роздаються; визначення операційних розмірів та операційних допусків.

Запропоновані конструкції несиметричного деформуючого інструменту, які дозволяють отримати розвантаження осередку деформації від дії тангенціальних розтягуючих напружень за рахунок виникнення дотичних та тим самим збільшити товщину стінки готового виробу. Також, за рахунок впровадження у виробництво та ремонтні майстерні таких пуансонів можна підвищити стійкість недеформованої частини заготовки, зменшуючи сили тертя у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Локалізація деформацій відбувається у зоні переходу більшого діаметру у менший, що найбільш небезпечно для форми пуансону, яка досліджувалась у роботі. Результати досліджень показали, що навіть конструкція інструменту з різким переходом діаметрів забезпечує отримання якісних деталей з потовщеною стінкою торця деталі, коли витримані запропоновані коефіцієнти роздавання. З'єднувальні елементи вихлопної системи автомобіля зі збільшеною товщиною стінки підвищать строк експлуатації та міжремонтні періоди за рахунок кращого протистояння корозійним та механічним руйнівним впливам.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bainschab M., Schriebl M. A., Bergmann A. Particle number measurements within periodic technical inspections: A first quantitative assessment of the influence of size distributions and the fleet emission reduction. *Atmospheric Environment*. 2020. X 8. P. 1-14.
2. Сивак Р.І. Пластичність металів при немонотонному навантаженні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. №1(91). С. 108-111.
3. Šolić T., Marić D., Samardžić I. Analysis of the vehicle exhaust system corrosion and its effect on the eco-test result. *Metalurgija*. 2022. Vol. 61. 3-4. P. 841-844.
4. Hudec J., Šarkan B., Czödörövá R. Examination of the results of the vehicles technical inspections in relation to the average age of vehicles in selected EU states. *Transportation Research Procedia*. 2021. No 55. P. 2-9.
5. Puricelli S., Casadei S., Bellin T., Cernuschi S., Faedo D., Lonati G., Rossi T., Grosso M. The effects of innovative blends of petrol with renewable fuels on the exhaust emissions of a GDI Euro 6d-TEMP car. *Fuel*. 2021. No 294. P. 1-13.
6. Aniekan I. et al. Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software. *International journal of engineering technologies-ijet*. 2017. Vol. 3. No 2. P. 50-60.
7. Ікпе А. Е., Овунна І., Ебуніло Р. О., Ікпе Е. Е. Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2016. No. 1 (1). P. 1-9.
8. Zimmermann K. *Lightweight design in exhaust systems using tailored products*: 9th International CTI Forum Exhaust Systems, Stuttgart, January 26 2011. Stuttgart, Germany, 2011.
9. Пузир Р.Г., Левченко Р.В., Аргат Р.Г., Сіра Ю.Б., Пузир В.Р., Дятловська В.Л. *Моделювання матеріалу циліндричної заготовки зі зварним швом при обтиску-роздачі*: матеріали наук.-техн. конф. "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"(XXI), м. Київ, 6 – 9 жовт. 2020 р. Київ, 2020. С. 406-407. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.213010>.
10. Пузир Р., Аргат Р., Климов Е., Черненко С., Черниш А., Сіра Ю., Гайков Р. Асиметричне роздавання трубних переходників автомобілів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, 2023. № 1(15). С. 12–18. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.02>
11. Rojek I. Technological process planning by the use of neural networks. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2017. No 31 (1). P. 1-15. doi:10.1017/S0890060416000147.
12. Srikar S. K., Navdeep Sh. D., Gurmeet S. Validation of erosion wear models for a stainless steel automobile exhaust manifold. *World Journal of Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2024-0146>.
13. Puzyr R., Shchetynin V., Vorobyov V., Salenko A., Arhat R., Haikova T., Yakhin S., Muravlov V., Skoriak Yu., Negrebetskyi I. Improving the Technology for Manufacturing Hollow Cylindrical Parts for Vehicles by Refining Technological Estimation Dependences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 6(1 (114)), P. 56–64. doi:10.15587/1729-4061.2021.244241.
14. Puzyr R., Klimov E., Chernish A., Chernenko S., Sira Y. The Optimal Conditions for Adding Strain to the Deformation Zone During the Expansion of Automobile Pipe Adapters. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_11.
15. Калюжний В. Л., Олександренко Я. С., Куліков І. П. Розрахунково-експериментальний аналіз відкритої роздачі трубчастих заготовок. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць*. 2014. № 1 (70). С. 63-68.
16. Maryin S.B., Phyto Wai Aung. Working Body for Deformation of Thin Walled Pipe Billets. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 628-633.
17. Min Ko Hlaing, Phone Htet Kyaw, Maryn B.N. Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 1. P. 885.
18. Puzyr R. H., Shchetynin V. T., Arhat R. H., Sira Yu. B., Muravlov V. V., Kravchenko S. I. *Numerical modeling of pipe parts of agricultural machinery expansion by stepped punches*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bucharest, 29th-30th October 2020, Bucharest, Romania 2020. Vol. 1018, 012013.

REFERENCES

1. Bainschab M., Schriebl M. A. & Bergmann A. (2020) Particle number measurements within periodic technical inspections: A first quantitative assessment of the influence of size distributions and the fleet emission reduction. *Atmospheric Environment*, 8, 1-14.

2. Syvak R.I. (2015) *Plastychnist metaliv pry nemonotonnomu navantazheni. Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1(91), 108-111.
3. Šolić T., Marić D. & Samardžić I. (2022) Analysis of the vehicle exhaust system corrosion and its effect on the eco-test result. *Metalurgija*, 61, 3-4, 841-844.
4. Hudec J., Šarkan B. & Czödöróvá R. (2021) Examination of the results of the vehicles technical inspections in relation to the average age of vehicles in selected EU states. *Transportation Research Procedia*, 55, 2-9.
5. Puricelli S., Casadei S., Bellin T., Cernuschi S., Faedo D., Lonati G., Rossi T. & Grosso M. (2021) The effects of innovative blends of petrol with renewable fuels on the exhaust emissions of a GDI Euro 6d-TEMP car. *Fuel*, 294, 1-13.
6. Ikpe Aniekan E., Orhorhoro Ejiroghene Kelly & Gobir Abdulsamad (2017) Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software. *International journal of engineering technologies-ijet*, 3, 2, 50-60.
7. Ikpe A. E., Owunna I., Ebunilo P. O. & Ikpe E. E. (2016) Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1 (1), 1-9.
8. Zimmermann K. (Eds.). (2011) *Lightweight design in exhaust systems using tailored products, 9th International CTI Forum Exhaust Systems, 2011*. Stuttgart, Germany.
9. Puzyr R.H., Levchenko R.V., Arhat R.H., Sira Yu.B., Puzyr V.R. & Diatlovska V.L. (Eds.). (2020) *Modeliuvannia materialu tsylindrychnoi zahotovky zi zvarnym shvom pry obtysku-rozdachi, materialy nauk.-tekh. konf. "Prohresyva tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita"(XXI), 2020*. Kyiv, Ukraina. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.213010>.
10. Puzyr R., Arhat R., Klymov E., Chernenko S., Chernysh A., Sira Yu. & Haikov R. (2023) Asymetrychne rozdavannia trubnykh perekhidnykiv avtomobiliv. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiakh, 1(15), 12–18. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.02>.
11. Rojek I. (2017) Technological process planning by the use of neural networks. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 31 (1), 1-15. doi:10.1017/S0890060416000147.
12. Srikar S. K., Navdeep Sh. D. & Gurmeet S. (2024) Validation of erosion wear models for a stainless steel automobile exhaust manifold. *World Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2024-0146>.
13. Puzyr R., Shchetynin V., Vorobyov V., Salenko A., Arhat R., Haikova T., Yakhin S., Muravlov V., Skoriak Yu. & Negrebetskyi I. (2021) Improving the Technology for Manufacturing Hollow Cylindrical Parts for Vehicles by Refining Technological Estimation Dependences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (114), 56–64. doi:10.15587/1729-4061.2021.244241.
14. Puzyr R., Klimov E., Chernish A., Chernenko S. & Sira Y. (Eds.). (2021) *The Optimal Conditions for Adding Strain to the Deformation Zone During the Expansion of Automobile Pipe Adapters, Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV, DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_11.
15. Kaliuzhnyi V. L., Oleksandrenko Ya. S. & Kulikov I. P. (2014) Rozrakhunkovo-eksperymentalnyi analiz vidkrytoi rozdachy trubchastykh zahotovok. *Visnyk NTUU «KPI»*. *Mashynobuduvannia: zbirnyk naukovykh prats*, 1 (70), 63-68.
16. Maryin S.B. & Phyto Wai Aung. (2019) Working Body for Deformation of Thin Walled Pipe Billets. *Materials Science Forum*, 945, 628-633.
17. Min Ko Hlaing, Phone Htet Kyaw & Maryn B.N. (Eds.). (2019) *Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System, Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.
18. Puzyr R.H., Shchetynin V.T., Arhat R.H., Sira Yu.B., Muravlov V.V., & Kravchenko S.I. (Eds.). (2020) *Numerical modeling of pipe parts of agricultural machinery expansion by stepped punches, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bucharest, 2020*. Bucharest, Romania.

R. Puzyr, D. Savielov, Roman Kachmar, I. Dmytriv, R. Kozlov, Ye. Yeruh. Justification of recommendations for the design of technological processes for manufacturing and repairing connecting elements in automotive exhaust systems

Vehicle exhaust systems are damaged by corrosion and mechanical stress. Connection zones at diameter transitions, especially those welded or tensioned, are particularly vulnerable. Increasing wall thickness can improve wear resistance and extend repair intervals, but this also adds weight to the components and the vehicle, which is not desirable.

Therefore, the current task remains to increase the wear resistance and reliability of components with a simultaneous reduction in the weight of the vehicle without the use of expensive materials.

This article presents a method for manufacturing and repairing exhaust system connecting pipes by forming bells with minimal end thinning. It offers general recommendations for designing the manufacturing and repair processes. Due to the complexity, time requirements, and high cost of stamping equipment, careful process development and selection of the most technically and economically effective approach are essential. Even minor changes in the process often require redesigning or producing new dies, which can be time-consuming and costly.

Recommended distribution coefficients are provided for steel 12X18N10T and aluminum AD1, both commonly used in automotive exhaust units. The suggested lubricants effectively reduce friction between the blank and tools during plastic deformation as the blank diameter increases. These lubricants are readily available and have proven effective in various applications.

The proposed method of dispensing with an asymmetric tool increases the thickness of the edge part compared to classic dispensing. This happens due to the appearance of tangential stresses that unload the deformation center. Because of this unloading, tangential normal tensile stresses are reduced, which increases the thickness of the finished product. The route for manufacturing a bell on a pipe blank includes an additional transition compared to classic dispensing.

Key words: exhaust system, repair, manufacturing, car, plastic deformation, bell, dispensing.

ПУЗИР Руслан Григорович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: puzyruslan@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>

САВСЛОВ Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: dvsavelov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5170-9621>

КАЧМАР Роман Ярославович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільний транспорт, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: roman.y.kachmar@lpnu.ua <https://orcid.org/0000-0002-5440-6853>

ДМИТРИВ Ігор Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільний транспорт, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: dmytriv_igor@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

КОЗЛОВ Ростислав Русланович, аспірант, кафедра машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: rowrost@gmail.com <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>

СРУХ Євгеній Ігорович, аспірант, кафедра машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: blackmamba0130@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-8229-5377>

Ruslan PUZYR, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automobiles and Tractors Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: puzyruslan@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>

Dmytro SAVIELOV, PhD in Engineering, associate professor of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: dvsavelov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5170-9621>

Roman KACHMAR, PhD in Engineering, associate professor of Road Transport Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: roman.y.kachmar@lpnu.ua <https://orcid.org/0000-0002-5440-6853>

Igor DMYTRIV, PhD in Engineering, associate professor of Road Transport Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: dmytriv_igor@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

Rostislav KOZLOV, postgraduate of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: rowrost@gmail.com <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>

Yevgeniy YERUH, postgraduate of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: blackmamba0130@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-8229-5377>

Дата надходження статті до видання: 15.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1932

Самостян В.Р., Гандзюк М.О., Дембіцький В.М.
Луцький національний технічний університет

ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Автомобільна галузь сьогодні перебуває у стані глибокої трансформації, зумовленої процесами цифровізації, яка стає ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності, ефективності та екологічної сталості. У статті розглянуто основні тенденції, виклики та перспективи розвитку автомобільної промисловості в умовах цифрової трансформації. Метою дослідження є визначення напрямів впливу цифрових технологій на виробництво, експлуатацію та управління транспортними системами, а також формування рекомендацій щодо підвищення ефективності галузі з урахуванням світових практик.

Результати дослідження свідчать, що цифровізація охоплює всі етапи життєвого циклу транспортного засобу – від проєктування до утилізації. Основними тенденціями є електрифікація транспорту, розвиток автономних та підключених систем, інтеграція Інтернету речей (IoT) і використання великих даних (Big Data) для підвищення безпеки та ефективності руху. Важливе місце займають технології цифрового двійника (Digital Twin), які дозволяють створювати віртуальні моделі транспортних засобів, проводити симуляційні випробування та прогнозувати технічний стан у реальному часі.

Окрему увагу приділено впровадженню хмарних платформ, дистанційної діагностики та оновлення програмного забезпечення Over-the-Air (OTA), що змінюють традиційні підходи до обслуговування автомобілів. Крім того, цифровізація сприяє появі нових бізнес-моделей – зокрема, концепції «Мобільність як послуга» (Mobility as a Service, MaaS), яка фокусується на доступі до мобільності через цифрові платформи, а не на володінні транспортним засобом.

У статті наголошується, що для України процес цифрової трансформації автомобільної галузі супроводжується певними викликами – застарілою виробничою базою, обмеженими інвестиціями та недостатнім рівнем цифрової інфраструктури. Водночас зростання інженерного потенціалу, цифрових компетентностей і участь у європейських інноваційних програмах створюють сприятливі передумови для інтеграції у глобальні процеси цифровізації транспортної сфери.

Ключові слова: автомобільна галузь, цифровізація, Індустрія 4.0, електромобілі, автономний транспорт, Інтернет речей (IoT), великі дані (Big Data), цифровий двійник, мобільність як послуга (MaaS), смарт-мобільність.

ВСТУП

Автомобільна галузь є однією з найдинамічніших і найтехнологічніших сфер світової економіки, яка справляє значний вплив на розвиток суміжних галузей – машинобудування, енергетики, електроніки, інформаційних технологій та екологічного сектору. У ХХІ столітті автомобільна промисловість вступила в етап глибокої структурної трансформації, основою якої є цифровізація усіх процесів життєвого циклу транспортного засобу – від наукових досліджень і проєктування до виробництва, експлуатації, обслуговування та утилізації.

Поняття цифровізації у сучасному контексті охоплює використання інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), великих даних (Big Data), хмарних технологій, віртуальної та доповненої реальності (VR/AR), блокчейну та технології цифрового двійника (Digital Twin). Вони створюють умови для формування нового типу транспортних систем – інтелектуальних, взаємопов'язаних і сталих, які відповідають вимогам сучасного суспільства та екологічним викликам.

За прогнозами McKinsey & Company (2024), до 2035 року близько 80 % нових автомобілів будуть оснащені постійним підключенням до мережі, а понад 50 % – матимуть часткові або повні автономні функції керування. Це свідчить про поступовий перехід від традиційної парадигми автомобілебудування до мобільності як послуги (Mobility as a Service, MaaS), де основний акцент зміщується з володіння транспортним засобом на інтеграцію цифрових сервісів мобільності.

Ключовим наслідком цифровізації є зміна структури доданої вартості в автомобільній індустрії. Якщо раніше основна частка формувалася на етапі виробництва механічних компонентів, то нині дедалі більшу роль відіграють програмне забезпечення, аналітика даних, кібербезпека та цифрова інфраструктура. Саме ці напрями стають вирішальними для конкурентоспроможності виробників на глобальному ринку.

Особливу увагу привертає розвиток електромобільного сектору [1], який демонструє експоненціальне зростання. Згідно з аналітичним звітом International Energy Agency (IEA, 2024), кількість електромобілів у світі перевищила 40 мільйонів одиниць, а частка їхніх продажів у загальному обсязі нових автомобілів досягла 18 %. Цей процес супроводжується цифровими

інноваціями – управлінням зарядом у реальному часі, оптимізацією маршрутів, інтеграцією транспортних засобів в енергомережу (V2G – Vehicle to Grid).

Цифрова трансформація торкається не лише технічних аспектів, а й організаційно-економічних моделей функціонування автомобільних підприємств. У виробництві активно застосовуються принципи Індустрії 4.0, що передбачають гнучку автоматизацію, роботизацію, використання сенсорних мереж, кіберфізичних систем і віртуальних моделей. Водночас на рівні управління розвиваються цифрові ланцюги постачання (Digital Supply Chains), які забезпечують інтеграцію усіх учасників виробничого процесу в єдиний інформаційний простір.

Важливо відзначити, що цифровізація автомобільного транспорту в Україні лише набирає обертів. У національному контексті її розвиток стримується низкою факторів – застарілою виробничою базою, недостатньою цифровою інфраструктурою, нестачею інвестицій та дефіцитом висококваліфікованих кадрів. Водночас Україна має значний потенціал інтеграції у глобальні процеси цифрової модернізації, зокрема завдяки розвитку інженерних ІТ-компаній, участі у міжнародних проєктах з електромобільності та впровадженню «розумних» транспортних систем у містах.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю системного аналізу тенденцій цифрової трансформації автомобільної галузі, виявлення її ключових напрямів, викликів та можливостей для підвищення ефективності галузі в умовах переходу до цифрової економіки. Результати такого аналізу мають практичне значення для виробників, транспортних компаній, наукових установ та освітніх організацій, які формують кадровий потенціал нового покоління.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відповідно до досліджень, автомобільна промисловість переживає четверту технологічну революцію (Industry 4.0), у якій цифрові технології є рушійною силою. Наприклад, дослідники відзначають, що цифрова трансформація охоплює теми підключених автомобілів, автономного керування, Big Data та нових бізнес-моделей у автомобільній промисловості [2].

Світові тенденції свідчать про швидке зростання ролі електромобілів, розвиток систем автономного керування та цифрових платформ управління мобільністю [3].

Попри позитивні результати цифрової трансформації, існують проблеми, пов'язані з високою вартістю впровадження технологій, недостатнім рівнем кібербезпеки, низькою готовністю інфраструктури до автономного транспорту та відсутністю єдиних стандартів обміну даними між виробниками [4].

Особливо гостро ці питання постають у країнах, що розвиваються, включно з Україною, де цифровізація транспортної системи перебуває на етапі становлення.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є виявлення основних тенденцій розвитку автомобільної галузі в умовах цифровізації та визначення напрямів підвищення ефективності її функціонування на основі сучасних технологічних рішень.

Для досягнення поставленої мети визначено такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан цифровізації автомобільної галузі.
2. Виокремити основні напрями впливу цифрових технологій на конструкцію, виробництво та експлуатацію транспортних засобів.
3. Визначити ключові виклики та бар'єри цифрової трансформації.
4. Запропонувати перспективні шляхи розвитку галузі з урахуванням світових трендів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У процесі дослідження встановлено, що цифровізація охоплює всі етапи життєвого циклу транспортного засобу – від проектування до виробництва, експлуатації та утилізації.

Впровадження технологій Індустрії 4.0 сприяє формуванню цифрової екосистеми автомобільної галузі, у межах якої відбувається інтеграція виробничих процесів, транспортних засобів, інформаційних платформ та споживачів у єдиний цифровий простір.

Таку структуру цифрової екосистеми наведено на рисунку 1.



Цифрова екосистема автомобільної галузі

Рисунок 1 – Цифрова екосистема автомобільної галузі

На основі аналізу наукових і аналітичних джерел [8] виділено п'ять ключових напрямів цифрової трансформації галузі, які формують сучасні тенденції її розвитку.

1. Електрифікація транспорту

Одним із найпомітніших трендів є масовий перехід до електромобілів (EV) та гібридних силових установок. Провідні виробники – Tesla, Volkswagen, BMW, Toyota, BYD – активно інвестують у створення лінійок повністю електричних моделей.

Цифрові технології відіграють ключову роль у розробці систем управління батареями (Battery Management Systems, BMS), оптимізації енергоспоживання, а також у побудові «розумних» зарядних мереж, інтегрованих в енергетичну інфраструктуру.

Сьогодні розвиток EV супроводжується створенням високоточних цифрових моделей акумуляторів, що дозволяють прогнозувати деградацію елементів та забезпечують ефективне керування зарядом і розрядом у режимі реального часу [9].

2. Розвиток автономних транспортних систем

Застосування штучного інтелекту (AI), комп'ютерного зору та глибинного навчання сприяє реалізації автономних функцій керування транспортом.

Системи ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), що включають автоматичне гальмування, утримання смуги руху, розпізнавання дорожніх знаків, формують основу майбутніх безпілотних автомобілів.

Компанії Waymo, NVIDIA, Mobileye, Volvo впроваджують комплексні програмно-апаратні рішення, здатні обробляти великі обсяги даних із сенсорів (лідарів, радарів, камер) для забезпечення безпечного руху.

Паралельно розвивається віртуальне тестування автономних систем – створюються симуляційні середовища, що дозволяють перевіряти алгоритми керування без ризику для життя людей і транспортних засобів.

3. Впровадження цифрових платформ обслуговування

Цифровізація змінює не лише конструкцію автомобіля, а й модель його експлуатації.

Поширення телематики, дистанційної діагностики та хмарних сервісів забезпечує постійну взаємодію між користувачем, виробником і сервісним центром.

Завдяки технологіям Over-the-Air (OTA) автовиробники можуть оновлювати програмне забезпечення автомобіля без відвідування сервісу, усувати недоліки, змінювати параметри керування або додавати нові функції.

Наприклад, Tesla та BMW використовують OTA-оновлення для покращення енергоефективності, безпеки та мультимедійних можливостей.

Також активно розвиваються цифрові екосистеми для керування парком транспортних засобів, що дозволяють оптимізувати логістику, моніторинг витрат палива, стан вузлів і маршрутів руху в режимі реального часу [3].

4. Використання технологій цифрового двійника

Технологія Digital Twin (цифровий двійник) дає змогу створювати віртуальні копії транспортних засобів, компонентів або цілих виробничих процесів.

Це дозволяє проводити моделювання, тестування та оптимізацію конструкцій без потреби у фізичних прототипах, що суттєво скорочує час і витрати на розробку.

Компанії, такі як Siemens, Bosch, General Motors, уже активно використовують цифрові двійники на етапах проектування, випробувань та прогнозування технічного стану автомобілів.

Крім того, технологія цифрового двійника є важливою складовою передбачуваного технічного обслуговування (Predictive Maintenance), яке базується на аналітиці даних сенсорів та алгоритмах машинного навчання [8].

5. Інтеграція IoT і Big Data

Сучасні автомобілі є мобільними цифровими пристроями, що генерують і передають великі обсяги даних – від інформації про навколишнє середовище до параметрів роботи систем.

Інтеграція з інтернетом речей (IoT) забезпечує постійний моніторинг стану транспортних засобів, збирання аналітики для вдосконалення продуктивності та безпеки.

Завдяки Big Data автовиробники можуть аналізувати поведінку користувачів, прогнозувати попит, підвищувати якість обслуговування, а також створювати індивідуалізовані сервіси для водіїв [5].

Крім того, обробка великих даних сприяє розвитку інтелектуальних транспортних систем (ITS), які оптимізують міські потоки, координують роботу світлофорів та зменшують викиди CO₂.

6. Нові бізнес-моделі та мобільність як послуга (MaaS)

Цифровізація зумовила появу нової концепції – Mobility as a Service (MaaS), що передбачає інтеграцію різних видів транспорту в єдину цифрову екосистему.

Модель MaaS орієнтована не на володіння автомобілем, а на доступ до мобільності через цифрові платформи – каршеринг, райдшеринг, мікромобільність.

Це змінює структуру попиту, стимулює розвиток електричного міського транспорту, зменшує навантаження на інфраструктуру та сприяє зниженню шкідливих викидів.

Для українського контексту така модель є перспективною з точки зору сталого розвитку та цифрової інтеграції міських транспортних систем.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати свідчать, що цифровізація сприяє появі нових бізнес-моделей у транспортній сфері – «мобільність як послуга» (Mobility as a Service, MaaS), каршеринг, смарт-транспортні системи. У той же час виникає потреба у формуванні нових компетенцій фахівців автомобільного профілю, які мають поєднувати інженерні та IT-знання.

Для України цифрова трансформація автомобільної галузі має не лише економічне, але й стратегічне значення, оскільки створює передумови для інтеграції у світові ланцюги доданої вартості, підвищення конкурентоспроможності та зниження екологічного навантаження.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що цифровізація виступає визначальним чинником розвитку сучасної автомобільної галузі, формуючи нові технологічні, економічні та організаційні підходи до створення, виробництва й експлуатації транспортних засобів. Вона не лише трансформує традиційні виробничі процеси, але й сприяє появі інноваційних бізнес-моделей, орієнтованих на клієнта, сталий розвиток та ефективне використання ресурсів.

Процеси цифрової трансформації охоплюють усі етапи життєвого циклу автомобіля: від інтелектуального проектування з використанням систем CAD/CAM/CAE до створення цифрових двійників, управління виробництвом за допомогою IoT і Big Data, а також моніторингу технічного стану транспортного засобу через хмарні сервіси. Такі технології забезпечують підвищення точності, якості та швидкості виробничих процесів, зменшення витрат і ризиків, а також можливість прийняття управлінських рішень у реальному часі.

Цифровізація відкриває нові перспективи для розвитку концепції «Мобільність як послуга» (Mobility as a Service, MaaS), яка передбачає перехід від моделі володіння транспортним засобом до моделі інтегрованого доступу до мобільності через цифрові платформи. Це сприяє формуванню

нових ринкових сегментів, підвищенню ефективності транспортних систем і зменшенню негативного впливу на довкілля.

У світовому масштабі провідними тенденціями розвитку автомобільної галузі є електрифікація, автономізація, підключення транспортних засобів до мережі, інтелектуалізація процесів обслуговування та інтеграція штучного інтелекту у функціонування транспортних систем. Ці процеси взаємопов'язані з розвитком Індустрії 4.0 і створенням розумних виробництв (smart factories), що функціонують на основі кіберфізичних систем.

Для України цифрова трансформація автомобільної галузі залишається складним, але необхідним процесом, який потребує оновлення виробничої бази, розвитку цифрових компетентностей персоналу, залучення інвестицій та інтеграції у міжнародні науково-технологічні програми. Позитивним чинником є наявність інженерного потенціалу, ІТ-фахівців та активна участь у європейських проєктах із впровадження інноваційних транспортних технологій.

Отже, цифровізація є не лише технологічною, а й стратегічною передумовою розвитку автомобільної галузі. Її ефективна реалізація забезпечить підвищення конкурентоспроможності підприємств, створення нових робочих місць, розвиток інтелектуальної мобільності та інтеграцію України у глобальний цифровий транспортний простір. Перспективами подальших досліджень є аналіз економічної ефективності впровадження цифрових технологій, а також оцінка екологічних і соціальних наслідків цифрової трансформації транспортної інфраструктури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Pustiulha, S., Samchuk, V., Dembitsky, V., Samostian, V., Prydiuk, V. Construction of the geometrical models of a multiple-factor optimization of the technical and operating parameters of the trolleybuses with an autonomous move margin // Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, 2022, 24(1), pp. B29–B40 <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.1.B29-B40>
2. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13662716.2022.2151873?utm_source=chatgpt.com "Digital Transformation of the Automotive Industry: An Integrating ...".
3. "Key technology trends in the automotive industry in 2025: Sustainability, autonomous driving, electrification, increased connectivity..." (2025). Epicflow. <https://www.epicflow.com/blog/5-latest-trends-in-the-automotive-industry/>.
4. Llopis-Albert, C., Rubio, F., & Valero, F. (2021). Impact of digital transformation on the automotive industry. Technological Forecasting and Social Change, 170, Article 120897.
5. Olmstead, L. (2024, December 20). Digital transformation in the automotive industry (+ examples). Whatfix. [<https://whatfix.com/blog/digital-transformation-automotive/>] (<https://whatfix.com/blog/digital-transformation-automotive/>)
6. Koyuncuoğlu, M. (2024). The importance of digital transformation in the automotive industry. Journal of Industrial Policy and Technology Management, 7 (1), 105-118.
7. Men, F., Dong, F., Liu, Y., & Yang, H. (2023). Research on the impact of digital transformation on the product R&D performance of automobile enterprises from the perspective of the innovation ecosystem. Sustainability, 15 (7), 6265.
8. Stoehr, N., Braesemann, F., Frommelt, M., & Zhou, S. (2019). Mining the automotive industry: A network analysis of corporate positioning and technological trends. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1912.10097>
9. "Digitalization: A game changer for the auto industry." (2024). NVIDIA Blog. <https://blogs.nvidia.com/blog/auto-digitalization/>
10. "Digital transformation in the automotive industry: Trends & use cases." (n.d.). FlowForma. <https://www.flowforma.com/blog/digital-transformation-in-automotive-industry-trends-and-use-cases>

V. Samostian, M. Handziuk, V. Dembitskyi. Tendencies in the development of the automotive industry under digitalization conditions

The automotive industry is currently undergoing a profound transformation driven by digitalization, which has become a key factor determining its competitiveness and sustainability. This research aims to identify the main trends, challenges, and opportunities related to the digital transformation of the global and Ukrainian automotive sectors. The study is based on a comprehensive analysis of scientific literature, industrial reports, and global best practices concerning the implementation of digital technologies in vehicle design, manufacturing, and operation.

The results demonstrate that digitalization influences all stages of the vehicle life cycle – from conceptual design and production to maintenance and utilization. The most significant technological trends include vehicle electrification, the development of autonomous and connected systems, the integration of Internet of Things (IoT) and Big Data technologies, and the use of digital twins for predictive diagnostics and virtual testing. The research also emphasizes the growing importance of over-the-air (OTA) updates, remote monitoring, and cloud-based platforms that transform traditional models of vehicle ownership and maintenance.

Another key trend is the emergence of new business models such as Mobility as a Service (MaaS), which shifts the focus from vehicle ownership to access to mobility services through digital platforms. These changes stimulate the evolution of smart transport ecosystems and encourage interdisciplinary collaboration between the automotive, IT, and energy sectors.

The article highlights that while developed countries are rapidly advancing toward fully digitalized transport systems, countries like Ukraine face certain barriers, including outdated production infrastructure and insufficient investment. However, the growing digital competence, engineering potential, and integration into European innovation networks create favorable conditions for accelerating digital transformation in Ukraine's automotive industry.

Keywords: automotive industry, digitalization, Industry 4.0, electric vehicles, autonomous transport, Internet of Things (IoT), Big Data, digital twin, Mobility as a Service (MaaS), smart mobility.

САМОСТЯН Віктор Русланович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: cvmfbf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-6823-8558>

ГАНДЗЮК Микола Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: Gandyuk64.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, <https://orcid.org/0000-0002-1006-9218>

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>

Mykola HANDZIUK, Ph.D in Engineering, associate professor of automobiles and transport technologies department, Lutsk National Technical University, e-mail: Gandyuk64.MG@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3552-4256>.

Valerii DEMBITSKYI, PhD. in Engineering associate professor of Motor Cars 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: 03.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1933

Сахно В.П.¹, Онищук В.П.², Босенко В.М.¹, Стельмашук С.В.²¹ Національний транспортний університет² Луцький національний технічний університет**ДО АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ АВТОМОБІЛЯ З ПРИЧЕПОМ КАТЕГОРІЇ O2**

У статті розглянуто процес екстреного гальмування автопоїзда у складі автомобіля-тягача та причепа категорії O2 з позиції забезпечення стійкості руху. Показано, що традиційний сталий розподіл сумарної гальмівної сили між осями автопоїзда не гарантує необхідної ефективності гальмування та може призводити до передчасного блокування коліс окремих осей. Об'єктом дослідження є автопоїзд «автомобіль-тягач – причіп O2» у гальмівному режимі, а метою – розроблення плоскої математичної моделі, яка дозволяє визначати нормальні реакції опорної поверхні на колеса, сили у тягово-зчипному пристрої та умови одночасного доведення всіх коліс до межі блокування.

Моделю побудовано на основі рівнянь рівноваги сил і моментів для тягача та причепа з урахуванням коефіцієнтів розподілу гальмівних сил, положення центрів мас ланок, динамічних радіусів коліс і висоти точки зчеплення. Аналітично отримано залежності для нормальних реакцій на осях автопоїзда та реакцій в опорно-зчипному пристрої, що дає змогу оцінити перерозподіл навантажень під час уповільнення.

Встановлено, що гальмівна сила, прикладена до осей причепа, викликає більш інтенсивну зміну реакцій на колесах задньої осі автомобіля-тягача порівняно з передньою, що зменшує коефіцієнт зчеплення, за якого відбувається блокування задніх коліс. Визначено умови одночасного доведення коліс автопоїзда до межі блокування та знайдено значення коефіцієнта зчеплення і частки загальної гальмівної сили, яка має припадати на осі причепа, для забезпечення стабільного гальмування без складання ланок.

Ключові слова: автопоїзд; автомобіль-тягач; причіп категорії O2; екстрене гальмування; розподіл гальмівних сил; нормальні реакції; тягово-зчипний пристрій; коефіцієнт зчеплення; блокування коліс; математична модель.

ВСТУП

В умовах збільшення швидкостей руху і щільності транспортного потоку важливого значення набувають конструктивні параметри і експлуатаційні властивості автотransпортних засобів /автопоїздів, зокрема/, що забезпечують безпеку руху. З погляду практичних цілей при розробці нових АТЗ, а також модернізації існуючих важливим стає не тільки причина порушення стійкості у будь-якому режимі руху, а реакція АТЗ на неї і управляючі дії водія, що є неоднозначними і нестабільними. Тому передбачається, що стійкість і керованість руху АТЗ повинні забезпечуватися конструктивними параметрами самої машини [1]

Вибір конструктивних параметрів АТЗ, що забезпечують саме ці властивості, підвищує активну безпеку експлуатації і знижує вірогідність дорожньо-транспортних пригод (ДТП) на транспортних операціях. Стійкість і керованість АТЗ в сукупності, у тому числі і в процесі гальмування, повинні 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 [2].

У процесі екстреного гальмування ймовірність порушення стійкості автопоїзда зростає, що обумовлене як зміною співвідношення у масі тягового автомобіля і причепа, так і розташуванням вантажу в їх кузовах. Особливо небезпечним навіть для одиничних автомобілів при екстреному гальмуванні є нерівномірність гальмівних сил на колесах передньої осі у разі блокування задніх коліс, оскільки вона спричиняє занос транспортного засобу [3-6]. При цьому зі збільшенням початкової швидкості гальмування та нерівномірності дії гальмівних механізмів коліс однойменних осей автомобілів і автопоїздів значно зростають величина гальмівного шляху, а також поперечні та кутові відхилення транспортних засобів. Для визначення цих показників гальмівної динаміки застосовують як експериментальні, так і аналітичні методи, що базуються на дослідженнях на математичних моделях, вибір яких для кожного конкретного випадку є актуальним [7,8].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ефективність використання автопоїздів у значній мірі залежить від їх швидкісного режиму. При цьому рух з великими швидкостями повинен бути стійким як у тяговому, так і гальмівному режимі, за якого транспортний засіб буде залишатися в межах смуги безпеки [9]. Згідно із нормативним документом [10,11] основними критеріями стійкості та ефективності гальмування транспортних засобів є: лінійне відхилення від коридору руху, шириною 3,5 м; загальна питома гальмівна сила γ_r ; коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил осей; тривалість спрацювання гальмівної

системи; усталене сповільнення $j_{уст}$; гальмівний шлях S_g ; початкова швидкість гальмування V_0 . Для забезпечення стійкості автопоїзда в процесі гальмування необхідно виконання ряду вимог [9], зокрема відсутність штовхаючих зусиль, направлених від причепа до тягача, рівність парціальних сповільнень всіх осей автопоїзда, дотримання нерівності $R_i \varphi \geq T_i$ для кожної осі автопоїзда, де R_i - величина опорної реакції на колесах i -ої осі, T_i - гальмівна сила на колесах i -ої осі, φ - коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою. Відношення

$$k_i = \frac{T_i}{\varphi R_i} \quad (1)$$

є критерієм стійкості для прямолінійного руху при гальмуванні.

За наявності бічної сили F_i (відцентрова сила, вітер тощо) критерієм стійкості є вираз

$$k_i = \frac{\sqrt{T_i^2 + F_i^2}}{R_i \varphi} \quad (2)$$

При значенні k_i більше одиниці в приведених виразах рух стає нестійким.

Різні показники характеризують стійкість транспортного засобу в процесі гальмування, але в граничному випадку важливим є визначення його абсолютного за час гальмування бічного і кутового зсувів [7], які визначають собою габаритний коридор руху, під яким мається на увазі максимальна ширина проїжджої частини дороги, що займається автопоїздом у кожний момент часу і обмежена його крайніми по відношенню до центру повороту габаритними точками.

В літературі також зустрічається термін "динамічний коридор" [7], під яким розуміється ширина проїжджої частини дороги, обмеженої двома паралельними вертикальними площинами, що проходять через бічні крайні точки ланок автопоїзда, що рухається, і "коридор безпеки"[7], який визначається за наступною формулою:

$$\frac{B_d}{2} \geq y + L_a \sin \beta + \frac{B_a}{2} \cos \beta, \quad (3)$$

де B_d - ширина смуги руху;

L_a, B_a - габарити транспортного засобу /довжина, ширина/;

y - поперечне відхилення центру мас;

β - кут розвороту подовжньої осі.

Слід відмітити, що більшість авторів пропонує оцінювати стійкість автомобілів при гальмуванні тими ж критеріями, що і в загальному випадку руху (накатом і з прискоренням). Для того, щоб врахувати вплив розподілу гальмівних сил між осями автомобіля, положення його центра мас на стійкість руху в роботі [7] запропонований критерій, що представляє собою кутове прискорення при малих кутових відхиленнях поздовжньої осі автомобіля

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\psi}{dt^2} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi g}{i_z^2} \times \frac{a}{1 - \beta_0 + \varphi \frac{h}{L}} \left\{ \sqrt{\left[\frac{b}{L}(1 - \beta_0) + \varphi \frac{h}{L} \right]^2 - \frac{a^2}{L^2} \beta_0^2 - \frac{b}{L}(1 - \beta_0)} \psi \right\}^* \\ \frac{\varphi g}{i_z^2} \times \frac{a}{\beta_0 - \varphi \frac{h}{L}} \left\{ \frac{a}{L} \beta_0 \psi - \sqrt{\left[\frac{a}{L} \beta_0 + \varphi \frac{h}{L} \right]^2 - \frac{b^2}{L^2} (1 - \beta_0)^2} \right\}^{**} \end{array} \right. \quad (4)$$

* - за випереджаючого блокування задніх коліс;

** - за випереджаючого блокування передніх коліс;

b - відстань від задньої осі до проекції центру мас автомобіля на горизонтальну площину;

h - висота центру мас автомобіля;

β_0 - коефіцієнт розподілу гальмівної сили по осям автомобіля, що визначається конструкцією гальмівної системи:

$$\beta_0 = \frac{P_{T1}}{P_{T1} + P_{T2}}, \quad (5)$$

де P_{T1}, P_{T2} - гальмівні сили, що розвиваються на колесах передньої і задньої осей.

Ряд дослідників [8,9,12-14] однією з основних причин складання ланок автомобільного поїзда вважають набігання причіпної ланки на автомобіль-тягач, яке виникає в результаті створення зусиль стиску в опорно-зчіпному пристрої. Тому значення сили в зчіпному пристрої, яка виникає при гальмуванні автомобільного поїзда, можна розглядати як один із критеріїв для оцінки стійкості транспортного засобу.

На основі дослідження стійкості автопоїзда у процесі гальмування, у роботі [7] 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. Також дослідники вказують на обернену залежність кута складання автопоїзда від ступеня його завантаження, коефіцієнта зчеплення шин з опорною поверхнею та часу випередження гальмування причіпної ланки відносно тягача.

При русі автопоїзда в режимі гальмування на нього діють різні по характеру, величині і напряму зовнішні сили. Це приводить до перерозподілу вертикальних навантажень в подовжній і поперечній площинах на колесах осей як автомобіля-тягача, так і напівпричепа [7]. У роботі [3] проведено спрощений аналіз стійкості автопоїзда як в тяговому, так і гальмівному режимі. Особлива увага приділяється поведінці автомобіля під час гальмування з обговоренням впливу різних конструктивних параметрів та розподілу гальмівних сил, що діють на колеса. Успіх у рішенні подібних задач залежить від того, наскільки вдало обрана математична модель і її істотні параметри, що описують поведінку динамічної системи у різних режимах руху. Теоретично модель автомобіля повинна якнайбільш повно відображати реальний АТЗ. Більшість дослідників, що займаються проблемами активної безпеки автомобіля, визнають важливість такого рівня моделювання, що дозволяє використовувати сучасні методи, і пошук якнайкращих рішень на базі інструментальних оцінок, що мають кількісний опис. Дослідження автомобіля як системи кількох тіл, що з'єднані голономними і неголономними в'язями, приводить до вивчення складної механічної системи з великою кількістю ступенів свободи, яка описується системою диференціальних рівнянь високого порядку. В роботі [15] відзначається, що ускладнення математичної моделі не завжди дає позитивний ефект, оскільки при визначенні масових розмірів (маси, моменти інерції) і характеристик зв'язків неминучі похибки, сполучення яких призводить до неточностей при визначенні кінцевих результатів. Крім того, практичне використання подібних розрахункових схем потребує попереднього аналітичного і, особливо, експериментального визначення великої кількості конструктивних параметрів автомобіля і шин. Тому при дослідженні стійкості руху АТЗ дедалі частіше використовують плоскі моделі з урахуванням нелінійного відведення коліс його осей.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка математичної моделі для аналізу процесу гальмування автомобіля з причепом категорії О2.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модуль за постійного розподілу сумарної гальмівної сили по осях автопоїзда;
- визначити нормальні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда;
- визначити умови одночасного доведення коліс автопоїзда до межі блокування у процесі екстреного гальмування;
- визначити значення коефіцієнта зчеплення коліс автомобіля-тягача з дорогою, за якого відбувається одночасне доведення до межі блокування усіх його коліс.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Максимально можлива гальмівна сила по зчепленню для конкретної осі, яку може реалізувати автомобільний поїзд визначається із відношення [1]:

$$R_{xi} = \varphi \cdot R_{zi}, \quad (6)$$

де R_{xi} – максимально можлива гальмівна сила i -ої осі автопоїзда; R_{zi} – нормальна реакція i -ої осі автопоїзда при гальмуванні; φ – коефіцієнт зчеплення шин з дорогою.

У дослідженні [6] автори зазначають, що при гальмуванні транспортного засобу без блокування коліс, гальмівні сили повинні прикладатися до осей коліс. Врахуємо це у даній роботі. На рис. 1 зображена схема сил, які діють на автопоїзд при гальмуванні з незаблокованими колесами. Для визначення нормальних реакцій опорної поверхні а також сил взаємодії ланок автопоїзда в тягово-

зчіпному пристрої складемо рівняння рівноваги усіх моментів, що діють окремо на тяговий автомобіль та причіп. Для цього умовно роз’єднаємо ланки автопоїзда (рис. 1).

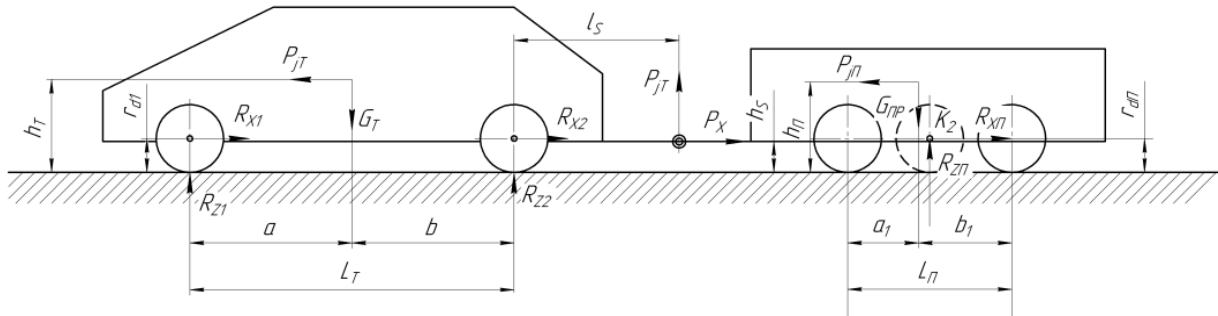


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на автопоїзд при гальмуванні

Рівняння рівноваги моментів, що діють на тяговий автомобіль у повздовжній площині складемо відносно передньої і задньої осі тягового автомобіля:

$$\sum M_A = P_{jt}(h_T - r_{d1}) - G_T a + R_{z2} L_T - R_{x2}(r_{d2} - r_{d1}) - P_z(L_T + l_s) - P_x(h_s - r_{d1}) = 0, \quad (7)$$

$$\sum M_B = P_{jt}(h_T - r_{d2}) + G_T b - R_{z1} L_T + R_{x1}(r_{d2} - r_{d1}) + P_x(h_s - r_{d2}) + P_z l_s = 0, \quad (8)$$

де G_T – сила тяжіння від маси тягового автомобіля у спорядженому стані; L_T – база тягового автомобіля; a, b, h_T – координати центра мас тягового автомобіля; h_s – висота розміщення площини тягово-зчіпного пристрою; l_s – відстань між опорою зчіпного пристрою та задньою віссю тягового автомобіля; r_{d1}, r_{d2} – динамічні радіуси передніх та задніх коліс тягового автомобіля відповідно; P_x, P_z – горизонтальна і вертикальна реакції в тягово-зчіпному пристрої; R_{z1}, R_{z2} – нормальні реакції на осях тягового автомобіля при гальмуванні. P_{jt} – сила інерції автомобіля.

$$\text{Оскільки } P_{jap} = -\frac{G_{an}}{g} \dot{V}_{an} = -G_{an} \times \varphi = -R_{xan} = -\sum_{i=1}^4 R_{zi} \times \varphi,$$

то

$$P_{jt} = -\frac{G_T}{G_T + G_{np}} R_{xan} = -\frac{1}{1 + G_{np}/G_T} R_{xan}, \quad (9)$$

де \dot{V}_{an} – лінійне сповільнення автопоїзда;

R_{xan} – загальна гальмівна сила автопоїзда.

$$R_{xan} = R_{x1} + R_{x2} + R_{xnp}, \quad (10)$$

$$R_{xnp} = R_{x3} + R_{x4}, \quad (11)$$

де R_{x1}, R_{x2} – сумарні гальмівні сили на передній та задній осях тягового автомобіля;

R_{xnp} – загальна гальмівна сила причепа;

R_{x3}, R_{x4} – сумарні гальмівні сили на осях причепа.

Складемо рівняння рівноваги моментів сил, що діють на причіп в повздовжній площині:

$$\sum M_O = P_{jp}(h_{np} - h_s) - G_{np}(L_{np} - a_1) + R_{znp} L_{np} + R_{xnp}(h_s - r_{dnp}) = 0, \quad (12)$$

$$\sum M_{K_2} = P_{jp}(h_{np} - r_{dnp}) + G_{np} d - P_z L_{np} - P_x(h_s - r_{dnp}) = 0, \quad (13)$$

де P_{jnp} – сила інерції причепа.

$$P_{jnp} = -\frac{G_{np}}{g} \dot{V}_{ап} = -\frac{G_{np}}{G_T + G_{np}} R_{хап} = -\frac{1}{1 + G_T/G_{np}} R_{хап}, \quad (14)$$

де G_{np} – сила тяжіння від маси причепа;

L_{np} – відстань між опорою зчпного пристрою та серединою здвоєної осі причепа;

a_1, b_1, h_{np} – координати центра мас причепа; d – відстань від центру мас причепа до середини здвоєної осі причепа;

r_{dnp} – динамічний радіус коліс причепа;

R_{z3}, R_{z4} – нормальні реакції на осях причепа при гальмуванні;

R_{znp} – сумарна нормальна реакція на колесах причепа.

$$R_{znp} = R_{z3} + R_{z4}. \quad (15)$$

Обчисливши рівняння (7), (8), (12), (13) із врахуванням рівнянь (9), (10), (14), отримаємо:

$$R_{хап} \frac{h_T - r_{d1}}{1 + G_{np}/G_T} - G_T a + R_{z2} L_T - R_{x2} (r_{d2} - r_{d1}) + P_z (L_T + l_s) - P_x (h_s - r_{d1}) = 0, \quad (16)$$

$$R_{хап} \frac{h_T - r_{d2}}{1 + G_{np}/G_T} + G_T b - R_{z1} L_T + R_{x1} (r_{d2} - r_{d1}) + P_x (h_s - r_{d2}) + P_z l_s = 0, \quad (17)$$

$$R_{хап} \frac{h_{np} - h_s}{1 + G_T/G_{np}} - G_{np} (L_n - a_1) + R_{znp} L_{np} + R_{xnp} (h_s - r_{dnp}) = 0, \quad (18)$$

$$R_{хап} \frac{h_{np} - r_{dnp}}{1 + G_T/G_{np}} + G_{np} d - P_z L_{np} - P_x (h_s - r_{dnp}) = 0. \quad (19)$$

Для більшості гальмівних систем розподіл сумарної гальмівної сили по осях автопоїзда до початку блокування коліс завжди постійний. Проте, дослідження [1-4] підтверджують, що гальмування автопоїзда з розподілом гальмівних сил по осях транспортного засобу зі сталими коефіцієнтами не буде максимально ефективним через постійну зміну умов, в яких відбувається процес гальмування. Зокрема Д. А. Антонов [1] встановив, що розподіл гальмівних сил по осях транспортного засобу необхідно здійснювати відштовхуючись від діючих нормальних навантажень. При цьому величина гальмівної сили має бути пропорційною навантаженню.

Визначимо коефіцієнти розподілу загальної гальмівної сили по осях автопоїзда:

$$\beta_1 = \frac{R_{x1}}{R_{хап}}, \quad \beta_2 = \frac{R_{x2}}{R_{хап}}, \quad \beta_{np} = \frac{R_{xnp}}{R_{хап}}, \quad (20)$$

Враховуючи рівняння (10), встановимо співвідношення між коефіцієнтами розподілу загальної гальмівної сили

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_{np} = 1, \quad (21)$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \beta_T, \quad (22)$$

де β_1, β_2 – коефіцієнти розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на передню та задню осі автомобіля-тягача;

β_{np} – коефіцієнт розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на осі причепа,

β_T – коефіцієнт розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на колеса автомобіля-тягача.

Із рівнянь (16-19), враховуючи (20) визначимо нормальні реакції на осях автопоїзда та вертикальну реакцію в опорно-зчїпному пристрої.

$$R_{z1} = G_T \frac{b}{L_T} + R_{xап} \left(\frac{(h_T - r_{d2})/L_T}{1 + G_{np}/G_T} + \beta_1 \frac{r_{d2} - r_{d1}}{L_T} \right) - P_x \frac{h_s - r_{d2}}{L_T} + P_z \frac{(L_T - l_s)}{L_T}, \quad (23)$$

$$R_{z2} = G_T \frac{a}{L_T} - R_{xап} \left(\frac{(h_T - r_{d1})/L_T}{1 + G_{np}/G_T} - \beta_2 \frac{r_{d2} - r_{d1}}{L_T} \right) + P_z \left(1 - \frac{l_s}{L_T} \right) - P_x \frac{h_s - r_{d1}}{L_T}, \quad (24)$$

$$R_{znp} = G_{np} \frac{(L_{np} - a_1)}{L_{np}} - R_{xап} \left(\frac{(h_{np} - h_s)/L_{np}}{1 + G_T/G_{np}} + \beta_{np} \frac{h_s - r_{dnp}}{L_{np}} \right), \quad (25)$$

$$P_z = G_{np} \frac{d}{L_{np}} + R_{xап} \frac{(h_{np} - r_{dnp})/L_{np}}{1 + G_T/G_{np}} - P_x \frac{h_s - r_{dnp}}{L_{np}}. \quad (26)$$

Для визначення реакцій в тягово-зчїпному пристрої складемо рівняння рівноваги сил, що діють на причіп вздовж горизонтальної та вертикальної осей

$$-P_x + P_{jnp} - R_{xnp} = 0, \quad (27)$$

$$P_z - G_{np} + R_{znp} = 0. \quad (28)$$

З рівняння (27), враховуючи (14), (20-22), визначимо горизонтальну реакцію P_x в опорно-зчїпному пристрої

$$P_x = P_{jnp} - R_{xnp} = R_{xап} \left(\frac{1}{1 + G_T/G_{np}} - \beta_{np} \right) = R_{xап} \left(\beta_T - \frac{1}{1 + G_{np}/G_T} \right). \quad (29)$$

З рівняння (28) визначимо вертикальну реакцію в опорно-зчїпному пристрої

$$P_z = G_{np} - R_{znp}. \quad (30)$$

Підставимо (29) в (26):

$$P_z = G_{np} \frac{d}{L_{np}} + R_{xап} \left(\frac{(h_{np} - h_s)/L_{np}}{1 + G_T/G_{np}} + \beta_{np} \frac{h_s - r_{dnp}}{L_{np}} \right). \quad (31)$$

Визначимо нормальні реакції опорної поверхні на осях тягового автомобіля. Для цього підставимо рівняння (29) та (30) в (23) і (24), враховуючи (25), отримаємо

$$R_{z1} = G_T \frac{b}{L_T} + G_{np} \frac{b_1}{L_{np}} \cdot \frac{l_s}{L_T} + R_{xап} \left[\frac{(h_T - h_s)/L_T}{1 + G_{np}/G_T} + \beta_1 \frac{h_s - r_{d1}}{L_T} + \beta_2 \frac{h_s - r_{d2}}{L_T} + \frac{l_s}{L_T} \left(\frac{(h_{np} - h_s)/L_{np}}{1 + G_T/G_{np}} + \beta_{np} \frac{h_s - r_{dnp}}{L_{np}} \right) \right], \quad (32)$$

$$R_{z2} = G_T \frac{a}{L_T} - G_{np} \frac{b_1}{L_{np}} \left(1 - \frac{l_s}{L_T}\right) - R_{xап} \left[\frac{(h_T - h_s)/L_T + \beta_1 \frac{h_s - r_{d1}}{L_T} + \beta_2 \frac{h_s - r_{d2}}{L_T} - \left(1 - \frac{l_s}{L_T}\right) \left(\frac{(h_{np} - h_s)/L_{np}}{1 + G_T/G_{np}} + \beta_{np} \frac{h_s - r_{dnp}}{L_{np}} \right) \right]. \quad (33)$$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рис. 2 наведено графік зміни нормальних реакцій опорної поверхні на осі автомобіля і причепа, з якого слідує, що гальмівна сила на осях причепа призводить до більш інтенсивної зміни реакцій на колесах задньої осі автомобіля, чим на передній. Це призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення, за якого настає блокування коліс задньої осі.

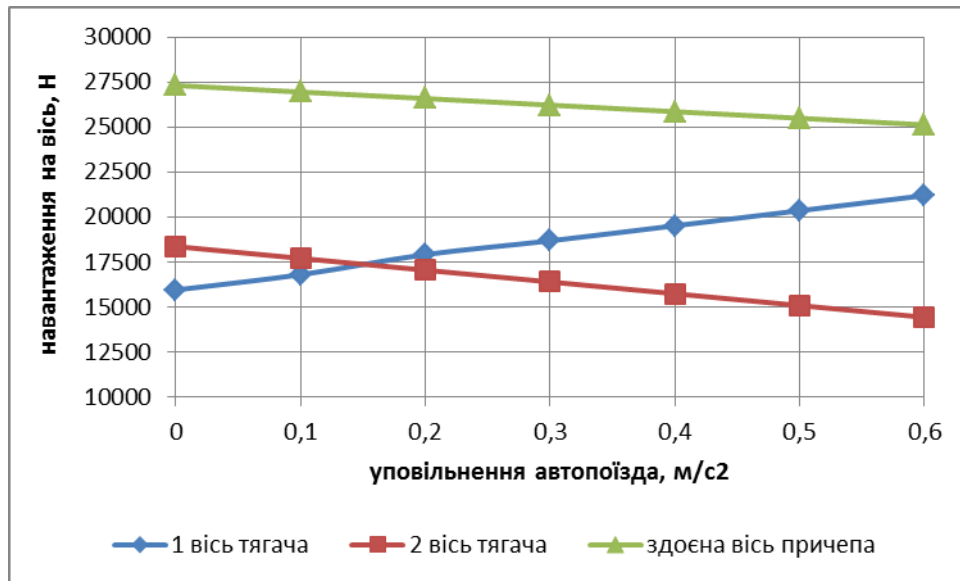


Рисунок 2 – Зміна нормальних реакцій опорної поверхні на осі автопоїзда в процесі гальмування

Оскільки максимальна гальмівна сила реалізується на колесі при доведенні його до межі блокування, то враховуючи рівняння (6) та (20), визначимо умови одночасного доведення коліс автопоїзда до межі блокування. Одночасне доведення до межі блокування коліс автомобіля-тягача відбудеться при виконанні таких умов:

$$R_{x1} = \beta_1 R_{xап} = \varphi R_{z1}, \quad (38)$$

$$R_{x2} = \beta_2 R_{xап} = \varphi R_{z2}. \quad (39)$$

Колеса напівпричепа перебуватимуть на межі блокування за умови:

$$R_{xnp} = \beta_{np} R_{xап} = \varphi R_{znp}. \quad (40)$$

Після підстановки рівняння (31) в (34), а (32) в (35), та після ряду перетворень отримаємо значення загальної гальмівної сили автопоїзда, що відповідатиме встановленим умовам

$$R_{\text{хал}} = \varphi G_{\tau} \frac{\frac{b}{L_{\tau}} - \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \frac{l_s}{L_{\tau}}}{\beta_1 \left(1 - \varphi \frac{h_s - r_{d1}}{L_{\tau}} \right) - \varphi \left[\frac{(h_{\tau} - h_s)/L_{\tau}}{1 + G_{\text{нп}}/G_{\tau}} + \beta_2 \frac{h_s - r_{d2}}{L_{\tau}} + \frac{l_s}{L_{\tau}} \left(\frac{(h_{\text{нп}} - h_s)/L_{\text{нп}}}{1 + G_{\tau}/G_{\text{нп}}} + \beta_{\text{нп}} \frac{h_s - r_{d\text{нп}}}{L_{\text{нп}}} \right) \right]}, \quad (41)$$

або

$$R_{\text{хал}} = \varphi G_{\tau} \frac{\frac{a}{L_{\tau}} + \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \left(1 - \frac{l_s}{L_{\tau}} \right)}{\beta_2 \left(1 + \varphi \frac{h_s - r_{d2}}{L_{\tau}} \right) + \varphi \left[\frac{(h_{\tau} - h_s)/L_{\tau}}{1 + G_{\text{нп}}/G_{\tau}} + \beta_1 \frac{h_s - r_{d1}}{L_{\tau}} - \left(1 - \frac{l_s}{L_{\tau}} \right) \left(\frac{(h_{\text{нп}} - h_s)/L_{\text{нп}}}{1 + G_{\tau}/G_{\text{нп}}} + \beta_{\text{нп}} \frac{h_s - r_{d\text{нп}}}{L_{\text{нп}}} \right) \right]}. \quad (42)$$

Отримані рівняння виражають умову доведення до межі блокування передніх (41) та задніх (42) коліс тягового автомобіля. Прирівнявши праві частини даних рівнянь, з'ясуємо значення коефіцієнта зчеплення φ_0 коліс з дорогою, при якому відбувається одночасне доведення до межі блокування всіх коліс автомобіля-тягача

$$\varphi_0 = \frac{\beta_1 \left[\frac{a}{L_{\tau}} + \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \left(1 - \frac{l_s}{L_{\tau}} \right) \right] - \beta_2 \left(\frac{b}{L_{\tau}} - \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \frac{l_s}{L_{\tau}} \right)}{\left(1 + \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \right) \left(\frac{(h_{\tau} - h_s)/L_{\tau}}{1 + G_{\text{нп}}/G_{\tau}} + \beta_1 \frac{h_s - r_{d1}}{L_{\tau}} + \beta_2 \frac{h_s - r_{d2}}{L_{\tau}} \right) - \frac{l_s + d}{L_{\tau}} \left(\frac{(h_{\text{нп}} - h_s)/L_{\text{нп}}}{1 + G_{\tau}/G_{\text{нп}}} + \beta_{\text{нп}} \frac{h_s - r_{d\text{нп}}}{L_{\text{нп}}} \right)} = 0,061 \quad (43)$$

При $\varphi < \varphi_0$ першими до межі блокування будуть доведені передні колеса тягача, а при $\varphi > \varphi_0$ – задні колеса. Аналізуючи рівняння (43), можна зробити висновок, що його чисельник практично дорівнює нулю, а тому:

$$\beta_1 \left[\frac{a}{L_{\tau}} + \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \left(1 - \frac{l_s}{L_{\tau}} \right) \right] = \beta_2 \left(\frac{b}{L_{\tau}} - \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \frac{l_s}{L_{\tau}} \right). \quad (44)$$

Тоді

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{\left(\frac{b}{L_{\tau}} - \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \frac{l_s}{L_{\tau}} \right)}{\left[\frac{a}{L_{\tau}} + \frac{G_{\text{нп}}}{G_{\tau}} \frac{d}{L_{\text{нп}}} \left(1 - \frac{l_s}{L_{\tau}} \right) \right]} = 0,843 \quad (45)$$

Підставимо рівняння (25) в (36). Після перетворень отримаємо величину гальмівної сили причепа, при якій його колеса перебуватимуть на межі блокування

$$R_{\text{хл}} = \varphi G_{\text{ан}} \frac{\frac{d}{L_{\text{нп}}}}{\beta_{\text{нп}} \left(1 - \varphi \frac{h_s - r_{d\text{нп}}}{L_{\text{нп}}} \right) - \varphi \frac{h_{\text{нп}} - h_s}{L_{\text{нп}} (1 + G_{\tau}/G_{\text{нп}})}} = 14347,1 \text{ Н} \quad (46)$$

Виходячи з величини загальної гальмівної сили автопоїзда, яка визначається рівняннями (32) або (33), та враховуючи, що $\varphi = \varphi_0$, коефіцієнт розподілу загальної гальмівної сили на колеса причепа, який забезпечить одночасне доведення всіх коліс автопоїзда до межі блокування, визначимо $\beta_{пр}$ – коефіцієнт розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на осі причепа. Отримаємо:

$$\beta_{пр} = \varphi_0 \frac{\frac{G_{пр}}{R_{х\text{ап}}} \frac{d}{L_{пр}} + \frac{h_{пр} - h_s}{L_{пр} (1 + G_t / G_{пр})}}{1 - \varphi_0 \frac{h_s - r_{dпр}}{L_{пр}}} = 0,431 \quad (47)$$

На рис.3 наведено графік розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на осі причепа, з якого слідує, що зменшення маси причепа призводить до зменшення долі причепа у загальній гальмівній силі автопоїзда. При цьому слід враховувати, що для забезпечення ефективності гальмування автопоїзда необхідно узгоджувати не тільки масові параметри тягового автомобіля і причепа, а і параметри їх гальмівних систем.

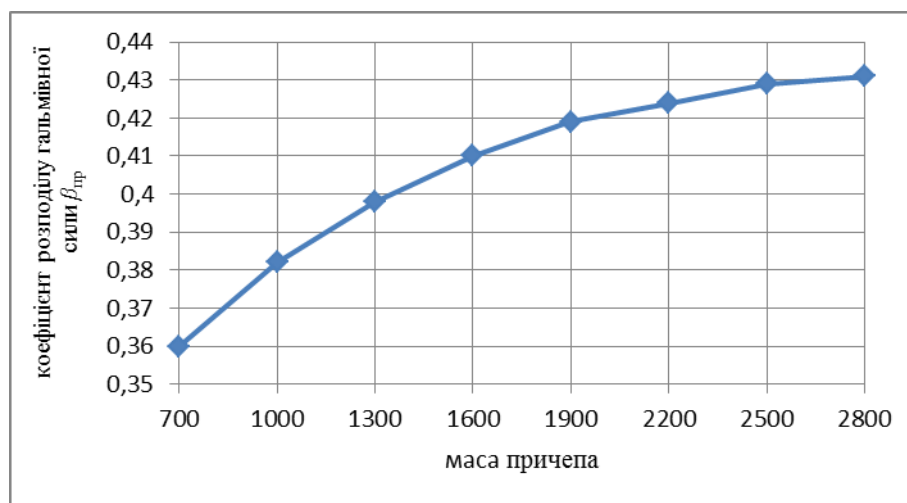


Рисунок 3 – Графік розподілу загальної гальмівної сили автопоїзда на осі причепа

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що за постійного розподілу сумарної гальмівної сили по осях автопоїзда до початку блокування коліс не забезпечується необхідна ефективність його гальмування. Розподіл гальмівних сил по осях транспортного засобу необхідно здійснювати відштовхуючись від діючих нормальних навантажень.

2. Показано, що гальмівна сила на осях причепа призводить до більш інтенсивної зміни реакцій на колесах задньої осі автомобіля, чим на передній. Це призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення, за якого настає блокування коліс задньої осі.

3. Визначені умови одночасного доведення коліс автопоїзда до межі блокування. При цьому встановлено, що зменшення маси причепа призводить до зменшення долі причепа у загальній гальмівній силі автопоїзда, тобто для забезпечення ефективності гальмування автопоїзда необхідно узгоджувати не тільки масові параметри тягового автомобіля і причепа, а і параметри їх гальмівних систем.

Розроблена математична модель автопоїзда в процесі гальмування може бути використана у подальшому для аналізу конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість автопоїзда у гальмівному режимі, а також для обґрунтування співвідношення маси автомобіля і причепа для забезпечення ефективності гальмування автопоїзда за відсутності антиблокувальної системи на осях причіпної ланки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сахно В. П., Онищук В. П., Стельмашук С. В. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автомобіля з причепом категорії O2 у гальмівному режимі//Науково-виробничий журнал “Автошляховик України” № 2 (279) 2024. С.74-85.
2. Сахно В.П. До питання щодо гальмування шарнірно-зчленованих автобусів /В.П.Сахно, В.М.Поляков, Д.М.Ященко, Д.М.Попелиш //Автошляховик України. – 2021, №2, С.10-17.
3. Подригало М. А. Вплив бортової нерівномірності гальмівних сил на відхилення автомобіля / М. А. Подригало, А. І. Коробко // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харків : ХНАДУ, 2009. – № 24. – С. 33-36.
4. Поляков В. М. Теоретичне дослідження впливу осевої нерівномірності гальмівних сил на стійкість автопоїзда / В. М. Поляков, Д. Ю. Приходченко, Д. А. Абрамов // Вісник СХУ імені Володимира Даля. – Луганськ : ВНТУ, 2007. – № 6 (112). – С. 59-62.
5. Прогній П. Б. До аналізу процесу гальмування сидельного автопоїзда без блокування коліс / П. Б. Прогній // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. – Вип. 13. – К. : НТУ, 2014. – С. 138-146.
6. Олександров Е. Е., Волков В. П., Волонцевич Д. О. та ін.; за ред. Д. О. Волонцевича. Підвищення стійкості та керованості колісних машин в гальмівних режимах : монографія. – Харків : НТУ «ХП», 2007. – 320 с.
7. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / [М. А. Подригало, В. П. Волков, В. И. Кирчатый, А.А. Бобошко]; Под. ред. М. А. Подригало.– Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2003 – 403 с.
8. Сахно В.П. Визначення параметрів стійкості автопоїзда з причепом категорії O2 /В.П.Сахно, В.В.Стельмашук, Р.В.Пазін// Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. – Monografia nr 15, Seria: Transport. – Rzeszow, 2018 – С. 93–102.
9. Сахно В.П., Поляков В.М., Стельмашук В.В., Попелиш Д.М. До визначення стійкості руху триланкового причіпного автопоїзда у гальмівному режимі. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2022.–№1(18).С.143-154. ISSN 2313-5425.
10. Сахно В.П., Мурований І.С., Онищук В.П., Стельмашук С.В., Вінцюк М.Я. До визначення стійкості руху автомобіля з причепом категорії O2 у гальмівному режимі //Сучасні технології в машинобудуванні і на транспорті, 2024. – С.296 – 306.
11. Файчук М. І. Огляд вимог нормативних документів відносно гальмівних властивостей автопоїздів / М. І. Файчук, В. М. Поляков, А. В. Горпинюк., О. М. Тімков // Вісник НТУ. – 2009. – № 18. – С. 45–50.
12. Кравчук П. М. Нормування гальмівних властивостей колісних транспортних засобів в Україні / П. М. Кравчук, Р. Ю. Нілов, Ю. В. Бабін // Науково-виробничий журнал Автомобільний транспорт: У реаліях міжнародного права. – 2014. – № 2(238). – С. 8-10.
13. Кузнецов Р. М. Покращання показників стійкості триланкових автопоїздів у граничних режимах руху : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02 / Р. М. Кузнецов. – К., 2007. – 176 с.
14. Кузнецов Р. М. До питання стійкості сидельно-причіпного автопоїзда у гальмівному режимі / Р. М. Кузнецов, Р. Л. Данилюк // Наукові нотатки: міжвуз. зб.. Луц. нац. техн. ун-т.. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ, 2011. – Вип. 32. – С. 197-199.
15. Кузнецов Р. М. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху триланкового причіпного автопоїзда / Р. М. Кузнецов, В. В. Лотиш, І. С. Мурований, В. П. Онищук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля. – 2008. – № 7 (125). – С. 84-87.
16. Сахно В.П., Поляков В.М., Стельмашук В.В., Попелиш Д.М. До визначення стійкості руху триланкового причіпного автопоїзда у гальмівному режимі. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2022.–№1(18).С.143-154. ISSN 2313-5425
17. Сахно В.П. До питання щодо гальмування шарнірно-зчленованих автобусів /В.П.Сахно, В.М.Поляков, Д.М.Ященко, Д.М.Попелиш //Автошляховик України. – 2021, №2, С.10-17.
18. Marchuk, R., Sakhno, V., Chovcha, I., Marchuk, N., Marchuk, M. To determine stability of the road train with O1-category trailer // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 119, 159-170. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.119.9>. (Web of Science, Scopus, Q4).
19. STABILITY OF THE TWO-LINK METROBUS / Volodymyr Sakhno, Viktor Polyakov, Igor Murovany, Svitlana Sharai, Oleg Lyashuk, Uliana Plekan, Oleg Tson, Mariana Sokol // Communications. 2/2023, Volume 25. Available online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.023/B77-85>

REFERENCES

1. Sakhno, V. P., Onyshchuk, V. P., & Stelmashchuk, S. V. (2024). Influence of design and operational factors on the stability of motion of a vehicle with an O2-category trailer in braking mode. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*, 2(279), 74–85.
2. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Yashchenko, D. M., & Popelysh, D. M. (2021). On the issue of braking of articulated buses. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*, (2), 10–17.
3. Podrigalo, M. A., & Korobko, A. I. (2009). Influence of uneven distribution of braking forces on vehicle deviation. *Automobile Transport: Collection of Scientific Papers*, 24, 33–36. Kharkiv: KhNAHU.
4. Polyakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Abramov, D. A. (2007). Theoretical study of the influence of axial non-uniformity of braking forces on the stability of a road train. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 6(112), 59–62. Luhansk: VNTU.
5. Prohni, P. B. (2014). Analysis of the braking process of a saddle-type road train without wheel locking. *Project Management, System Analysis and Logistics: Scientific Journal*, 13, 138–146. Kyiv: NTU.
6. Oleksandrov, E. E., Volkov, V. P., Volontsevych, D. O., et al. (2007). *Improving stability and controllability of wheeled vehicles in braking modes* (D. O. Volontsevych, Ed.). Kharkiv: NTU “KhPI”.
7. Podrigalo, M. A., Volkov, V. P., Kirchatyi, V. I., & Boboshko, A. A. (2003). *Maneuverability and braking properties of wheeled vehicles* (M. A. Podrigalo, Ed.). Kharkiv: KhNAHU Publishing.
8. Sakhno, V. P., Stelmashchuk, V. V., & Pazin, R. V. (2018). Determination of stability parameters of a road train with an O2-category trailer. In *Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia* (Monograph No. 15, Series: Transport, pp. 93–102). Rzeszów: Politechnika Rzeszowska.
9. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Stelmashchuk, V. V., & Popelysh, D. M. (2022). Determination of the stability of motion of a three-link articulated road train in braking mode. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(18), 143–154. Lutsk: LNTU. ISSN 2313-5425.
10. Sakhno, V. P., Murovanyi, I. S., Onyshchuk, V. P., Stelmashchuk, S. V., & Vintsiuk, M. Ya. (2024). Determining the stability of a vehicle with an O2-category trailer in braking mode. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 296–306. Lutsk: LNTU.
11. Faichuk, M. I., Polyakov, V. M., Horpyniuk, A. V., & Timkov, O. M. (2009). Review of normative requirements concerning braking properties of road trains. *Bulletin of NTU*, 18, 45–50.
12. Kravchuk, P. M., Nilov, R. Yu., & Babyn, Yu. V. (2014). Standardization of braking properties of wheeled vehicles in Ukraine. *Automobile Transport: In the Realities of International Law*, 2(238), 8–10.
13. Kuznetsov, R. M. (2007). *Improving stability indicators of three-link road trains in extreme driving modes* (PhD dissertation). Kyiv: National Transport University.
14. Kuznetsov, R. M., & Danyliuk, R. L. (2011). On the stability of saddle-type articulated road trains in braking mode. *Scientific Notes of Lutsk National Technical University*, 32, 197–199.
15. Kuznetsov, R. M., Lotysh, V. V., Murovanyi, I. S., & Onyshchuk, V. P. (2008). Influence of design and operational factors on the stability of motion of a three-link articulated road train. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 7(125), 84–87.
16. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Stelmashchuk, V. V., & Popelysh, D. M. (2022). Determination of the stability of motion of a three-link articulated road train in braking mode. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(18), 143–154. Lutsk: LNTU. ISSN 2313-5425.
17. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Yashchenko, D. M., & Popelysh, D. M. (2021). On the issue of braking of articulated buses. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*, (2), 10–17.
18. Marchuk, R., Sakhno, V., Chovcha, I., Marchuk, N., & Marchuk, M. (2023). To determine stability of the road train with an O1-category trailer. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 119, 159–170. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.119.9>
19. Sakhno, V., Polyakov, V., Murovanyi, I., Sharai, S., Lyashuk, O., Plekan, U., Tson, O., & Sokol, M. (2023). Stability of the two-link Metrobus. *Communications*, 25(2), B77–B85. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.023/B77-85>

Sakhno V. P., Onyshchuk V. P., Bosenko V. M., Stelmashchuk S. V. Analysis of the Braking Process of a Vehicle with an O2-Category Trailer.

The paper considers the emergency braking of a vehicle combination consisting of a towing vehicle and an O2-category trailer with regard to directional stability. It is shown that the widely used constant distribution of the total braking force between the axles of the road train does not ensure braking efficiency and may cause premature wheel lock on individual axles. The object is the vehicle–trailer road train in

braking mode; the aim is to develop a planar mathematical model for determining normal reactions on the wheels, forces in the coupling and the conditions for simultaneous approach of all wheels to the lock limit.

The model is based on equilibrium equations of forces and moments for the towing vehicle and the trailer, taking into account braking-force distribution coefficients, coordinates of centers of mass, dynamic tyre radii and the height of the coupling point. Analytical expressions are derived for normal reactions on all axles and for vertical and horizontal reactions in the coupling, which makes it possible to evaluate redistribution of axle loads during deceleration.

It has been established that the braking force acting on the trailer axles causes a more intensive change of reactions on the wheels of the rear axle of the towing vehicle than on the front axle, which reduces the adhesion coefficient at which the rear wheels lock. Conditions for simultaneous attainment of the lock limit by all wheels of the combination have been obtained, as well as the optimum share of the total braking force that should be assigned to the trailer axles. The proposed model can be used when choosing mass and braking-system parameters of vehicles with O2-category trailers to ensure stable and efficient braking without anti-lock systems.

Keywords: vehicle combination; towing vehicle; O2-category trailer; emergency braking; distribution of braking forces; normal reactions; coupling device; adhesion coefficient; wheel lock; mathematical model.

САХНО Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: svp_40@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0002-5144-7131>

ОНИЦЬУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8646-6263>

БОСЕНКО Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: bosia4ok@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9654-949X>

СТЕЛЬМАЩУК Станіслав Валерійович, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, e-mail: stanislav0077@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

Volodymyr SAKHNO, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automobiles, National Transport University, Kyiv, Ukraine; e-mail: svp_40@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0002-5144-7131>

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine; e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8646-6263>

Volodymyr BOSENKO, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automobiles, National Transport University, Kyiv, Ukraine; e-mail: bosia4ok@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9654-949X>

Stanislav STELMASHCHUK, PhD student, Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine; e-mail: stanislav0077@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

Дата надходження статті до видання: 12.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1934

Соколенко О.В.
Національний транспортний університет, м.Київ

МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕЛЕМАТИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

З розвитком електронного оснащення автомобілів неухильно зростає роль телематики в автомобільній промисловості. За різними оцінками більша частина інновацій в галузі пов'язана саме з електронікою. Підвищення безпеки на автомобільному транспорті досягається завдяки системам допомоги водієві (ADAS) – обробці даних зору, радару, візуалізації та датчикам, а також адаптивним системам освітлення, технологіям відображення та моніторингу для користувача. Екологічність забезпечується системами керування двигуном, високоефективною інтелектуальною силовою електронікою. Транспортні засоби оснащуються системами визначення позиції на місцевості та обміну інформацією. Розробляється концепція підключених транспортних засобів, що постійно надають інформацію про себе та отримують інформацію про оточуюче середовище. На сьогодні авто виробники оснащують контрольними датчиками всі важливі вузли автомобіля, в результаті чого формується потік даних про роботу ключових систем транспортного засобу. Телематика уособлює поєднання технологій збору та передачі інформації від автомобіля. Вона інтегрує GPS-відстеження, бортову діагностику, сенсорні технології та системи бездротового зв'язку в єдину систему управління транспортними засобами та водіями. Телематика забезпечує оптимізацію операційної діяльності за допомогою динамічного планування маршрутів, моніторингу поведінки водіїв та управління паливною ефективністю.

Для вирішення задачі прогнозного технічного обслуговування та покращення життєвого циклу транспортних засобів потрібно обрати ефективний спосіб віддаленого зв'язку. Обрана технологія має відповідати вимогам по дальності передачі інформації, швидкості та безпечності передачі даних. Інформація, що передається має бути своєчасно оброблена та бути змістовною для прийняття управлінських рішень менеджментом транспортних компаній.

Ключові слова: телематика, телематична система, діагностичні параметри, бортова діагностика, інтелектуальні транспортні системи, бездротовий зв'язок, прогнозування технічного стану.

ВСТУП

Телематичні системи вже більше 20 років є предметом уваги багатьох фахівців автомобільної галузі з різних країн. Значення технології постійно зростає, адже за її допомогою можна отримувати цінну інформацію про продуктивність транспортних засобів, відстежувати місцезнаходження, поведінку водіїв та витрату палива, технічний стан транспортних засобів. Отримана інформація є базою для формування управлінських рішень та удосконалення системи технічного обслуговування автомобілів. Таким чином підвищується ефективність управління автопарком, знижуються витрати на підтримання рухомого складу в робочому стані, підвищується безпека для водіїв та навколишнього середовища [1].

Технологія телематики створена на стику телекомунікації та інформатики. Початково вона базувалась на вирішенні задач GPS-навігації. Це був метод моніторингу автомобілів, вантажівок, обладнання та інших активів за допомогою технології GPS та бортової діагностики (OBD) для відображення переміщень активів на комп'ютеризованій карті. Але в подальшому відбувся суттєвий розвиток її функціональних можливостей [1]. Сьогодні функції охоплюють збір, аналіз та передачу даних з відділених джерел за допомогою телекомунікаційних пристроїв. Можливості телематики почали застосовувати для підвищення безпеки на транспорті. Зараз розробників цікавлять GPS-навігація, дистанційна діагностика, відстеження транспортних засобів у режимі реального часу та системи реагування на надзвичайні ситуації. Телематика автомобілів інтегрує GPS-відстеження, бортову діагностику, сенсорні технології та системи бездротового зв'язку в єдину систему управління транспортними засобами та водіями. Призначення технології в обміні інформацією між транспортними засобами та центрами обробки даних. Фахівці вважають цю технологію одним із найважливіших технологічних досягнень в управлінні транспортом за останнє десятиліття [3]. Завдяки інтеграції телематики автомобільна промисловість суттєво трансформується. Початково системи встановлювались на преміальні легкові автомобілі, проте сьогодні це важлива функція багатьох сучасних транспортних засобів. До розвитку телематики спонукала гостра необхідність покращити комунікацію в транспортній галузі [2]. Технологія має великий потенціал для підвищення економічної ефективності транспортних підприємств.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Автономні та підключені транспортні засоби – це новітні технології, які викликали надзвичайний інтерес з погляду підвищення безпеки на транспорті, екологічності та економічності

використання автомобілів. Поступовий розвиток технологій заклав основу для розробки Інтелектуальних Транспортних Систем (ІТС). Світові корпорації почали розробки в напрямку створення автономних автомобілів. Цей крок базується на використанні телематичних систем в керуванні автомобілем. Розвиток ІТС вважають одним з ключових факторів підтримки ролі транспортного сектора, в тому числі і адаптації до кліматичних змін і пом'якшення їх наслідків [4].

Новітні технологічні системи значною мірою залежать від бездротової передачі даних та зв'язку. Використовуючи технологію GPS, бортову діагностику, датчики та системи бездротового зв'язку, телематика автопарку створює комплексну систему даних, яка трансформує спосіб управління транспортними засобами та водіями. Завдяки можливості збору інформації з понад 70 точок даних автомобіля менеджери автопарку отримують новий рівень керування операціями. Передаються детальні показники щодо місцезнаходження транспортного засобу, витрати палива, діагностики двигуна, поведінки водія та операційної ефективності [3].

Оператори автопарків в США, які впроваджують телематичні рішення, повідомляють про економію палива від 20 до 30%, що призводить до значного зниження витрат на паливомісткі операції [6]. Оскільки підприємства автомобільної галузі знаходяться під зростаючим тиском підвищення ефективності, телематика автопарку набирає все більше значення в досягненні цих цілей. Широке впровадження технологій 4G та 5G ще більше прискорило розвиток телематичних можливостей. Оскільки телематика продовжує розвиватися, інтеграція з машинним навчанням та штучним інтелектом дозволяє використовувати дедалі складнішу прогнозну аналітику, оптимізацію маршрутів та автоматизоване управління відповідно вимогам [3].

В основу телематики було покладено технологію глобального позиціонування (GPS), яка дозволяє точно відстежувати транспортні засоби з точністю, як правило, в межах 3-5 метрів. Дослідження, що оцінюють комерційні GPS-приймачі, продемонстрували середню похибку позиціонування 2,54 метра в умовах відкритого неба зі стандартним відхиленням 1,28 метра за кількома тестовими сценаріями. Продуктивність знижується в міських умовах, де будівлі перешкоджають супутниковим сигналам, що призводить до зниження точності на 30-45%. Сучасні телематичні системи долають ці обмеження завдяки допоміжній GPS (A-GPS), яка покращує точність позиціонування в складних умовах, використовуючи дані стільникової мережі. Телематичні рішення безпосередньо взаємодіють з бортовими діагностичними портами (OBD) транспортних засобів, отримуючи доступ до шини CAN (Controller Area Network) для отримання критично важливих даних про продуктивність. Цей стандартизований інтерфейс, обов'язковий для транспортних засобів з 1996 року, забезпечує доступ до сотень параметрів транспортного засобу в режимі реального часу [3].

Перспективним є використання таких систем для контролю технічного стану транспортного засобу, руху та розташування автомобіля, оптимізації маршрутів та часу доставки вантажів кінцевому замовнику. Ця технологія є комбінацією роботи датчиків для збору інформації, мобільних передавачів та засобів отримання інформації, GPS трекерів та програмного забезпечення для обробки даних. Телематичні системи здатні передавати великі масиви інформації. Цілоком можна представити сучасний підключений транспортний засіб у вигляді складної сенсорної мережі. Комплекс важливих потоків даних постійно генерується та передається інформація про технічний стан та продуктивність транспортного засобу. Інтерфейси бортової діагностики фіксують та надають доступ до кодів несправностей. Також фіксується інформація про прискорення, бічні коливання, гальмування автомобіля. Вся ця інформація може бути використана для ефективного керування парком рухомого складу та контролем за його технічним станом [2].

За допомогою телематики можливе планування складних маршрутів з врахуванням зміни умов доставки. Є розробки телематичних платформ, що використовують дані про дорожній рух у режимі реального часу для визначення оптимальних маршрутів доставки. Враховуються дані про дорожній рух, погодні умови та пропонується оптимальний варіант маршруту. Також фіксується поведінка водія, яка суттєво впливає на безпеку, ефективність та експлуатаційні витрати [7].

Для автомобільних підприємств України характерне домінування автопарку в 10-15 автомобілів. Прослідковується тенденція збільшення середнього віку рухомого складу [5]. Використання сервісів відділеної підтримки від виробника все ще не має широкого розповсюдження на ринку автомобільних перевезень. Швидше можна казати про початковий стан запровадження. Переважна більшість підприємств галузі мають гостру потребу в контролі за технічним станом як на виробництві так і під час рейсу.

Постає питання чи технічно можливе широке застосування телематики автомобільними підприємствами нашої країни враховуючи структуру та специфіку автопарку.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В цьому дослідженні розглядаються технології бездротової передачі даних та можливість використання телематики для прогнозування технічного стану транспортних засобів. З огляду на структуру рухомого складу українських підприємств за віком та кількістю, актуальним є пошук рішення, що зможе надати можливість контролювати віддалено та акумулювати інформацію про технічний стан транспортних засобів. Особливу увагу фахівців привертає збір діагностичної інформації саме під час руху, при робочому навантаженні на двигун, паливну систему та електропроводку автомобіля. Таке рішення має бути доступним для пересічного автотранспортного підприємства та зручним у використанні. Важливо реалізувати збір основних діагностичних параметрів, що надають базову інформацію про роботу двигуна, витрату пального, гальмівної системи, коробки переключення передач та зчеплення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для передачі даних в телематиці використовується кілька технологій, що мають свої пріоритети застосування в залежності від конкретної задачі. Стільникові мережі формують основний канал передачі даних, а технологія 4G забезпечує середню швидкість висхідного з'єднання 5-12 Мбіт/с у мобільному середовищі, що достатньо для передачі 20-40 Мб телематичних даних щодня на один транспортний засіб [8]. З'єднання Bluetooth забезпечують зв'язок на короткій відстані з мобільними пристроями та периферійними датчиками зі швидкістю передачі даних до 3 Мбіт/с. Підключення Wi-Fi пропонує високошвидкісну передачу даних, коли транспортні засоби знаходяться в межах досяжності інфраструктури депо, ефективно розвантажуючи кешовані діагностичні журнали та відеодані. Для операцій у віддалених районах супутниковий зв'язок забезпечує глобальне покриття з доступністю 98%, хоча й зі зниженою швидкістю передачі даних 2,4 – 9,6 кбіт/с [3].

Розвиток технологій передачі даних бездротовим способом відбувається за наступними напрямками: на основі WLAN на основі стільникового зв'язку. Використання цих технологій дозволяє розробляти типи підключення «автомобіль-автомобіль» (V2V) та «автомобіль-все»(V2X). Стандарт IEEE 802.11 також відомий як DSRC (Dedicated Short-Range Communications – виділений зв'язок ближнього радіусу дії) був розроблений для підтримки нових застосувань, що використовують бездротовий зв'язок між транспортними засобами. Він містить дві основні мережеві топології: інфраструктурну BSS та незалежну BSS (IBSS). Обидві ці топології призначені для мобільних пристроїв, і синхронізація між вузлами потрібна через маяки. Вони ідентифікуються за допомогою унікального BSSID. Реалізація 802.11p в автомобільному середовищі вимагає встановлення в керуванні заздалегідь визначених частотних каналів, таких як G5-CCN [10]. Оригінальний зв'язок V2X використовує технологію WLAN та працює безпосередньо між транспортними засобами (V2V), а також між транспортними засобами та дорожньою інфраструктурою (V2I). WLAN особливо добре підходить для зв'язку V2X завдяки низькій затримці. Проте WLAN обмежений ближнім, в декілька сотень метрів, радіусом дії.



Рисунок 1 Концепція підключених транспортних засобів [4].

3GPP (3rd Generation Partnership Project) – партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній, головною метою створення якої є розробка та впровадження стандартів для мережевих технологій третього покоління (3G), стандартизація архітектури мереж та сервісів. Стільникова

технологія на основі 3GPP - Cellular-V2X (C-V2X) пропонує чудову продуктивність та більш перспективний радіодоступ, ніж IEEE 802.11p, і може використовувати стандарти та тести верхнього рівня ETSI-ITS, ISO, SAE та IEEE, які вдосконалювалися автомобільною промисловістю та іншими членами спільноти ITS протягом понад десятиліття [11].

C-V2X охоплює поточні та майбутні програми V2X з покращеними архітектурами та функціями радіорівня, використовуючи стільникові технології як основу. Фундаментальний момент полягає в тому, що C-V2X включає кілька режимів передачі, один з яких – V2N. V2N використовує комерційну стільникову мережу та польове обладнання, яким керують оператори мобільних мереж (MNO). Включення оператора мобільної мережі для V2N дозволяє використовувати спектр поза межами ITS, у низьких діапазонах для високої надійності обслуговування, до міліметрових хвиль у 5G для передачі великих обсягів даних. На додаток до V2N, прямий зв'язок C-V2X наразі розроблений для роботи в спектрі ITS (5,9 ГГц) у режимі, що забезпечує анонімність та відсутність вимоги до стільникового зв'язку. Однією з головних переваг стільникового зв'язку є те, що він може охоплювати всі програми V2X наскрізним способом за допомогою тієї ж технології, і тому є масштабним та розвивається. Прямий зв'язок C-V2X заснований на технічних специфікаціях 3GPP, дозволяє здійснювати зв'язок V2V (Vehicle to Vehicle), V2I (Vehicle to Infrastructure) та V2P (Vehicle to Pedestrian) без вимог до додаткової мережевої інфраструктури. C-V2X має кращу продуктивність прямого зв'язку порівняно з 802.11p, а також пропонує вищий ступінь безпеки для всіх режимів роботи. Для технології C-V2X продовжуються випробування стабільності та дальності зв'язку в умовах мегаполісу та на віддалених міжміських трасах [11].

Технологія LoRa (скорочено від long range – довгий діапазон) – це техніка модуляції з розширеним спектром від компанії Semtech. Ця бездротова платформа вирізняється великим радіусом дії та низьким енергоспоживанням. Пристрої та мережі LoRa, такі як LoRaWAN®, дозволяють створювати інтелектуальні IoT (Internet of Things) додатки, що використовуються у вирішенні найвідповідальніших задач в різних галузях. Завдяки великій дальності дії LoRa, низькому енергоспоживанню та можливостям геолокації без GPS, вантажі, транспортні засоби та інші активи можна легко контролювати у великих географічних регіонах та в складних умовах, де традиційні рішення для зв'язку не спрацьовують [12].

LoRa використовує передові датчики, які забезпечують безперебійне підключення та відстеження в режимі реального часу у масштабних мережах поставок. Датчики з підтримкою LoRa забезпечують виконання таких задач як:

- моніторинг місцезнаходження, стан та переміщення цінних вантажів, контейнерів та обладнання по глобальних ланцюгах поставок,
- моніторинг холододового ланцюга забезпечення оптимальних умов для товарів, чутливих до температури, протягом транспортування та зберігання,
- відстеження продуктивності транспортних засобів, оптимізації маршруту та поведінки водіїв,
- автоматизація моніторингу запасів, оптимізація використання сховища.

Слід відмітити, що пристрої живляться від батарейок та розгортаються в морських контейнерах, рефрижераторах, складах, розподільчих центрах, морських судах та віддалених сховищах. Бездротова радіочастотна технологія LoRa від Semtech забезпечує покриття на великій відстані, наднизького енергоспоживання та тривалого терміну служби акумулятора, пристрої з підтримкою LoRa забезпечують підключення до глобальних ланцюгів поставок, складних транспортних умов та віддалених логістичних об'єктів. Працюючи на неліцензованому спектрі з мережами LoRaWAN ці пристрої пропонують економічно ефективні, масштабовані рішення, що доповнюють існуючу стільникову, супутникову та Wi-Fi інфраструктуру.

Ключові характеристики LoRa включають:

- Довга дальність: LoRa зазвичай має радіус дії 10-20 кілометрів на відкритих просторах (в залежності від потужності передавача може бути до 50 км.), що забезпечує надійний зв'язок навіть з відділеними датчиками або пристроями.
- Низьке енергоспоживання – LoRa ідеально підходить для пристроїв, що працюють від батарейок.
- Адаптивна швидкість передачі даних (ADR) – пристрої LoRa можуть автоматично регулювати швидкість передачі даних залежно від умов навколишнього середовища та якості зв'язку. Це підвищує енергоефективність, забезпечуючи при цьому надійність зв'язку.

- Розвиток протоколу LoRaWAN з відкритим кодом сприяє поширенню технології.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – це мережевий рівень технології LoRa, який дозволяє пристроям LoRa підключатися до інтернету [13]. Основними компонентами LoRaWAN є:

- Низькоенергетичні датчики та пристрої, що підключаються до мережі LoRaWAN.
- Шлюзи які отримують дані від пристроїв LoRa та передають їх до мережі.
- Сервер мережі LoRaWAN, який керує та обробляє вхідні дані від шлюзів, а також забезпечує зв'язок з відповідним пунктом призначення.
- Сервер додатків обробляє вхідні дані від LoRaWAN, аналізує їх на рівні додатків та зберігає або представляє їх користувачеві.
- LoRaWAN базується на протоколі Aloha та дозволяє кільком вузлам передавати дані в одному спектрі. Крім того, LoRaWAN забезпечує безпечний зв'язок завдяки наскрізному шифруванню та заходам безпеки.

Принципи роботи LoRaWAN включають:

- Збір даних датчиків: Дані з пристроїв LoRa збираються сусудніми шлюзами LoRa.
- Передача даних через шлюзи по мережі LoRaWAN з використанням необхідних протоколів.
- Обробка мережевим сервером та забезпечення ним зв'язку з відповідним сервером додатків для подальшої обробки.
- Обробка на рівні додатків.

Chirp Spread Spectrum (CSS) – це фундаментальний метод модуляції, що використовується в LoRa. Цей метод модуляції дозволяє досягти далекого радіусу дії та низького енергоспоживання. Основний принцип CSS полягає в модуляції несучої частоти лінійно змінним сигналом. На відміну від традиційних методів модуляції, де несуча частота є постійною, в CSS вона змінюється з часом, що призводить до «розподілу» сигналу в частотній області.

Модуляція CSS в LoRa забезпечує одну з ключових переваг LoRa – її зв'язок на великій відстані та низьке енергоспоживання. Крім того, вона забезпечує гнучкість для розробників, враховуючи різні сценарії застосування.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Стандарт IEEE 802.11p – надає можливість реалізації бездротового доступу в транспортних середовищах. Це включає обмін даними між транспортними засобами та дорожньою інфраструктурою – Vehicle to Everything (V2X) у ліцензованому діапазоні ITS 5,9 ГГц. Технологія широко застосовується для розвитку Інтелектуальних Транспортних Систем. Проте особливостями використання технології є близький радіус дії для передавання інформації, обмежена швидкість передачі даних, високе енергоспоживання, відносно висока вартість розвитку мережі. Майбутнє застосування цього стандарту зв'язку пов'язано з транспортною інфраструктурою мегаполісів.

C-V2X має ефективність, зростаючу продуктивність та розширення майбутніх застосувань в перспективах недосяжних для 802.11p. У довгостроковій перспективі оператори мобільних мереж можуть використовувати існуючу стільникову інфраструктуру для сприяння ефективному розгортанню технології V2X. Основний напрямок застосування технології в забезпеченні безпеки руху через постійне передавання інформації від лідару, радарів та камер транспортних засобів до центрів обробки інформації та інших транспортних засобів.

LoRaWAN – має дальній радіус дії, низьку енергозатратність, простоту розгортання та достатню швидкість та захищеність передачі даних. Технологія має активний розвиток в транспортній галузі. Першочергово датчики збирають дані зі свого середовища, надалі пристрої використовують модуляцію LoRa для передачі зібраних даних пакетами, шлюзи в радіусі дії кінцевих пристроїв приймають пакети даних та передають отримані дані на мережевий сервер, що служить центром керування мережею LoRaWAN. Мережевий сервер керує мережею LoRaWAN, виконуючи різні завдання: автентифікацію, шифрування даних і маршрутизацію.

ВИСНОВКИ

Розвиток телематики доводить можливість та доцільність отримання діагностичної інформації від автомобілів під час руху з робочим навантаженням. Для виконання задачі передачі інформації від транспортних засобів в різних режимах руху найбільш ефективним та економічно доцільним є застосування технології LoRa через мережу LoRaWAN. Використання цієї технології забезпечує швидку передачу необхідного об'єму інформації при низькому енергоспоживанні та мінімальним вимогам до інфраструктури. Розгортання та обслуговування мережі не вимагає високих

капіталовкладень при цьому технологія має достатній рівень захисту інформації. Пристрої з підтримкою LoRa можуть передати цінні дані для оцінки технічного стану автомобіля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Jerry L. Davis, Lynda Peters, Kathleen Kiernan Autonomous and connected vehicles: a law enforcement primer // Naval postgraduate school, Monterey, California – December 2015, 102 sh.
2. What is telematics? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.geotab.com/blog/what-is-telematics/> (дата звернення 17.08.2025).
3. Lavanya Jacintha Victor, Fleet telematics: Transforming transportation through data-driven solutions // World Journal of Advanced Research and Reviews, 2025, 26(01), 3970-3976.
4. AASHTO Executive Committee, AASHTO Connected Vehicle Field Infrastructure Footprint Analysis: Preparing to Implement a Connected Vehicle Future: Preparing to Implement a Connected Vehicle Future (Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014), <http://stsmo.transportation.org/Documents/Executive%20Briefing.pdf>.
5. Савін Ю.Х., Соколенко О.В. - Контроль технічного стану транспортних засобів шляхом аналізу інформації з бортової діагностики в процесі експлуатації – Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2025, №1 (24) <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743>
6. Uffizio, "The Benefits of Implementing a Telematics Fleet Management System for Business," Uffizio.com, 2024. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://uffizio.com/blog/the-benefits-of-implementing-a-telematics-fleet-management-system-for-business/> (дата звернення 21.08.2025).
7. Ping Peng et al., "Impact of Driver Behavior on Fuel Consumption: Classification, Evaluation and Prediction Using Machine Learning," IEEE Access PP(99):1-1, 2019. [Електронний ресурс]. Available: World Journal of Advanced Research and Reviews, 2025, 26(01), 3970-3976 Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/333584625_Impact_of_Driver_Behavior_on_Fuel_Consumption_Classification_Evaluation_and_Prediction_Using_Machine_Learning (дата звернення 22.08.2025).
8. Simone Savasta, Marco Pini, Gustavo Marfia Performance Assessment of a Commercial GPS Receiver for Networking Applications // ReaserchGate, Conference Paper in Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) February 2008.
9. "History of Wireless". Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health. Archived from the original on 2007-02-10. Retrieved 2007-02-17.
10. Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. Draft ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11).
11. An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU. - 5G Automotive Association. 5 December 2017.
12. IoT Applications for Smart Supply Chain & Logistics with LoRa® Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-supply-chain-logistics> (дата звернення 25.09.2025).
13. What is LoRa Technology? An Innovative Approach to Long-Range Wireless Communication [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://redz-sc.com/en/blog/what-is-lora-technology-an-innovative-approach-to-long-range-wireless-communication> (дата звернення 27.08.2025).

REFERENCES

1. Jerry L. Davis, Lynda Peters, Kathleen Kiernan Autonomous and connected vehicles: a law enforcement primer // Naval postgraduate school, Monterey, California – December 2015, 102 sh.
2. What is telematics? [Online]. – Access: <https://www.geotab.com/blog/what-is-telematics/> (the date of access 17.08.2025).
3. Lavanya Jacintha Victor, Fleet telematics: Transforming transportation through data-driven solutions // World Journal of Advanced Research and Reviews, 2025, 26(01), 3970-3976.
4. AASHTO Executive Committee, AASHTO Connected Vehicle Field Infrastructure Footprint Analysis: Preparing to Implement a Connected Vehicle Future: Preparing to Implement a Connected Vehicle Future (Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014), <http://stsmo.transportation.org/Documents/Executive%20Briefing.pdf>.
5. Savin Y.F., Sokolenko O.V. - Control of the technical condition of vehicles through analysis of information from on-board diagnostics during operation.– Modern technologies in mechanical engineering and transport, 2025, №1 (24) <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743>

6.Uffizio, "The Benefits of Implementing a Telematics Fleet Management System for Business," Uffizio.com, 2024. [Online]. - Access: <https://uffizio.com/blog/the-benefits-of-implementing-a-telematics-fleet-management-system-for-business/> (the date of access 21.08.2025).

7.Ping Peng et al., "Impact of Driver Behavior on Fuel Consumption: Classification, Evaluation and Prediction Using Machine Learning," IEEE Access PP(99):1-1, 2019. [Online]. Available: World Journal of Advanced Research and Reviews, 2025, 26(01), 3970-3976 Access:https://www.researchgate.net/publication/333584625_Impact_of_Driver_Behavior_on_Fuel_Consumption_Classification_Evaluation_and_Prediction_Using_Machine_Learning (the date of access 22. 08.25).

8. Simone Savasta, Marco Pini, Gustavo Marfia Performance Assessment of a Commercial GPS Receiver for Networking Applications // ReaserchGate, Conference Paper in Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) February 2008.

9."History of Wireless". Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health. Archived from the original on 2007-02-10. Retrieved 2007-02-17.

10.Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. Draft ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11).

11.An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU. - 5G Automotive Association. 5 December 2017.

12.IoT Applications for Smart Supply Chain & Logistics with LoRa® Technology [Online]. – Access: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-supply-chain-logistics> (the date of access 25.09.2025).

13.What is LoRa Technology? An Innovative Approach to Long-Range Wireless Communication [Online]. – Access: <https://redz-sc.com/en/blog/what-is-lora-technology-an-innovative-approach-to-long-range-wireless-communication> (the date of access 27.08.2025).

Sokolenko O. V. The possibility of using telematics for monitoring the technical condition of vehicles.

With the development of electronic equipment in cars, the role of telematics in the automotive industry is steadily growing. According to various estimates, most of the innovations in the industry are related to electronics. Increased safety in motor transport is achieved thanks to driver assistance systems (ADAS) - processing of vision data, radar, visualization and sensors, as well as adaptive lighting systems, display and monitoring technologies for the user. Environmental friendliness is ensured by engine control systems, highly efficient intelligent power electronics. Vehicles are equipped with systems for determining position on the ground and exchanging information. The concept of connected vehicles is being developed, which constantly provide information about themselves and receive information about the surrounding environment. Today, automakers equip all important vehicle components with control sensors, as a result of which a data flow is formed about the operation of key vehicle systems. Telematics represents a combination of technologies for collecting and transmitting information from the vehicle. It integrates GPS tracking, on-board diagnostics, sensor technologies and wireless communication systems into a single vehicle and driver management system. Telematics optimizes operational activities through dynamic route planning, driver behavior monitoring and fuel efficiency management.

To solve the problem of predictive maintenance and improve the life cycle of vehicles, it is necessary to choose an effective method of remote communication. The selected technology must meet the requirements for information transmission range, speed and security of data transmission. The transmitted information must be processed in a timely manner and be meaningful for making management decisions by the management of transport companies.

Keywords: telematics, telematics system, diagnostic parameters, on-board diagnostics, intelligent transport systems, wireless communication, technical condition prediction.

СОКОЛЕНКО Олександр Вікторович - Національний транспортний університет, аспірант кафедри «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», e-mail: ovsl2022@gmail.com, тел. +380674074893, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0009-0007-6085-5843>.

SOKOLENKO Oleksandr - National Transport University, Post graduate student of the "Technical operation of cars and car service" department, e-mail: ovsl2022@gmail.com, tel. +380674074893, Ukraine, 01010, Kyiv, str. Mykhailo Omelyanovich-Pavlenka, 1, k 410. orcid.org/0009-0007-6085-5843.

Дата надходження статті до видання: 09.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1935

Солтус А. П.¹, Клімов Е. С.², Тарандушка Л. А.¹
¹Черкаський державний технологічний університет
²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ БІЧНОМУ ВІДВЕДЕННЮ

Проаналізовано існуючі методики та наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення коефіцієнта опору бічному відведенню на недеформованій опорній поверхні. Під час дослідження цього коефіцієнта у роботі розглядається шина, складовою частиною цілісного механізму яким є еластичне колесо. Водночас розрізняється рух колеса по криволінійній траєкторії та плоско-паралельний рух з відведенням. Під час руху колеса по криволінійній траєкторії відбувається одночасно бічне зміщення диска та його закручування відносно відбитка шини, що спричинює бічну силу та момент закручування відносно вертикальної осі. Плоско-паралельний рух колеса з відведенням зумовлює бічне зміщення диска відносно відбитка шини, що спричинює бічну силу, яка зміщена відносно центра відбитка шини. Як рух по криволінійній траєкторії, так і плоско-паралельний рух з відведенням пов'язані з бічною силою, яка залежить від коефіцієнта опору бічному відведенню. Запропоновано визначати експериментально коефіцієнт опору бічному відведенню шин вантажних автомобілів, використовуючи автомобіль безпосередньо як тестер. Наведено аналітичні залежності, які пов'язують функціонально коефіцієнт опору бічному відведенню, бічну жорсткість шини, кутову жорсткість відносно вертикальної осі та поздовжню вісь контактного відбитка. Ці залежності дозволяють визначати цей коефіцієнт побічним методом. Подано результати експериментальних та розрахункових даних цього коефіцієнта для широкопрофільної шини 1300x530-533 мод. ВИД-201, яка встановлюється на повнопривідних автомобілях КраЗ.

Результати досліджень можуть стати у нагоді фахівцям, які працюють над покращенням керованості та стійкості руху автомобілів.

Ключові слова: коефіцієнт опору бічному відведенню, кут відведення, бічна жорсткість, контактний відбиток шини, методика, недеформована опорна поверхня.

ВСТУП

Коефіцієнт опору бічному відведенню характеризує шину під час руху колеса по криволінійній траєкторії та під час плоско-паралельного руху з кутом відведення. Оскільки під час експлуатації колісний транспортний засіб рухається з різними радіусами кривизни по криволінійній траєкторії та навіть під час руху по прямолінійній траєкторії, а у разі дії бічної сили – з відведенням, тому значення коефіцієнта опору бічному відведенню необхідне для визначення керованості та стійкості руху. Оскільки коефіцієнт опору бічному відведенню пов'язаний з бічною силою під час руху по криволінійній траєкторії або під час плоско-паралельного руху з відведенням, тому експериментально може визначатись за цих умов руху. Виникає проблема щодо визначення бічної сили під час руху особливо коліс вантажних автомобілів, які мають значні навантаження та габарити. Визначенню методики експериментальних досліджень коефіцієнта опору бічному відведенню шин з урахуванням їх габаритів та навантажень присвячена ця робота.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Характеристики шини формуються її пружними властивостями та поділяються на статичні, виміряні у нерухомому стані, та кінематичні – виміряні під час її кочення. З огляду дії на шину бічної сили до статичних характеристик належить бічна жорсткість шини k_s , до кінематичних – коефіцієнт опору бічному відведенню k_e .

Бічну жорсткість шини k_s визначають як похідну бічної сили F_y відносно бічного зміщення y , при $y = 0$:

$$k_s = \left. \frac{\partial F_y}{\partial y} \right|_{y=0}. \quad (1)$$

У роботах [1, 2] говориться, що бічна жорсткість тісно пов'язана з характеристиками шини під час кочення з відведенням. Жорсткість протектора на згинання значно більша, ніж жорсткість боковини, тому деформацією гуми протектора нехтують. Бічне зміщення y в точці поперечного навантаження F_y є сумою поступального бічного зміщення y_1 та бічного зміщення y_2 , спричиненого позаплощинним поворотом. Бічну жорсткість шини визначають так:

$$K_y = \frac{F_y}{y} = \frac{F_y}{y_1 + y_2} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi r_A k_s} + \frac{r_A^2}{R_{mz}}}, \quad (2)$$

де r_A – радіус колеса; k_s – бічна основна жорсткість шини на одиницю довжини на поверхні протектора; R_{mz} – кутова жорсткість шини.

Коефіцієнт опору бічному відведенню k_δ визначають як похідну бічної сили F_δ відносно кута відведення δ , при $\delta = 0$:

$$k_\delta = \left. \frac{\partial F_\delta}{\partial \delta} \right|_{\delta=0}. \quad (3)$$

За малого кута відведення характеристику $F_\delta = f(\delta)$ можна апроксимувати лінійною залежністю, нахил якої до осі абсцис дорівнює коефіцієнту опору бічному відведенню k_δ .

Цей коефіцієнт залежить від нормального навантаження на шину, тиску повітря в шині [3, 4], типу шини, її розміру, кількості шарів корду, кута корду, ширини колеса [5–7]. Для конкретної шини основними чинниками є навантаження та тиск повітря в шині. Вплив швидкості вважається незначним.

Унаслідок збільшення навантаження на шину та тиску в шині значення коефіцієнта k_δ збільшується. Аналіз результатів експериментальних досліджень k_δ шин легкових та вантажних автомобілів [8] показав, що для протестованих шин легкових автомобілів коефіцієнт досягає максимуму за номінального навантаження та зменшується з подальшим збільшенням нормального навантаження. Для шин вантажних автомобілів коефіцієнт k_δ продовжує збільшуватися понад номінальне навантаження, хоча темп збільшення зменшується.

У радіальних шинах коефіцієнт опору бічному відведенню більший, ніж у діагональних [9].

Залежність коефіцієнта опору бічному відведенню від нормального навантаження виражають поліномом другого або вищого порядку [5]:

$$k_\delta = aG_k - bG_k^2, \quad (4)$$

де a, b – коефіцієнти; G_k – нормальне навантаження на шину. Значення коефіцієнтів a, b у роботі не зазначається.

У моделі шини Н. Расейка, «Магічна формула» [10], залежність коефіцієнта опору бічному відведенню від нормального навантаження запропоновано подавати як синусоїдальна залежність:

$$k_\delta = a_3 \sin[2 \arctg(G_k/a_4)], \quad (5)$$

де a_3, a_4 – емпіричні коефіцієнти; G_k – нормальне навантаження. Типові значення коефіцієнтів: $a_3 = 55$ кН/рад, $a_4 = 4$ кН [4].

У роботі [11] коефіцієнт опору бічному відведенню пропонується визначати як функцію нормального навантаження з урахуванням типу шин так:

$$k_\delta = kG_k, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт, величина якого залежить від типу шини; для радіальних шин $k = 0,16$ 1/град, для діагональних $k = 0,128$ 1/град.

У роботі [12] коефіцієнт опору бічному відведенню рекомендують визначати за виразом:

$$k_\delta = \frac{57,3(9...11)G_k \cdot 10^{-3}}{a}, \quad (7)$$

де k_δ – коефіцієнт опору бічному відведенню, Н/рад; a – поздовжня вісь контактної відбитка шини, приведена до рівновеликого прямокутника, м; G_k – навантаження на колесо, Н.

У роботі [13] наведено результати експериментальних досліджень бічної жорсткості шини P215/75 R14, які проводились на стенді з горизонтальною опорною поверхнею. При навантаженні на колесо $G_k = 9100$ Н, тиску повітря $p_{in} = 0,22$ МПа бічна жорсткість шини склала $k_s = 559500$ Н/м.

Для аналізу наведених залежностей проведемо розрахунки коефіцієнта опору бічному відведенню для широкопрофільної шини 1300x530-533 мод. ВИД-201, радіальної шини 9.00-20Р мод. И-Н142Б, шини підвищеної прохідності 1200x440-530 мод. И-П184. Результати розрахункових та експериментальних даних, які отримані на заводах виробників автомобілів КраЗ та КамАЗ наведено у табл. 1.

Із аналізу табл. 1 видно, що результати розрахункових даних суттєво різняться між собою. Найбільш достовірні дані забезпечує залежність (7).

На підставі проведеного аналізу та враховуючи значущість коефіцієнта опору бічному відведенню під час дослідження керованості та стійкості автомобіля, сформульовано мету роботи.

Таблиця 1 – Результати дослідження коефіцієнта опору бічному відведенню

Коефіцієнт опору бічному відведенню k_δ	Шина		
		1300x530-533 мод. ВИД-201 $G_k = 27$ кН, $a = 0,29$ м	9.00-20Р мод. И-Н142Б $G_k = 21,5$ кН, $a = 0,24$ м
$k_\delta = 57,3 \times 55 \sin[2 \arctg(G_k/4)]$, Н/рад (5)	15955	19827	16538

$k_g = 57,3 (0,128 \dots 0,16) G_{кs}$, Н/рад (6)	198028	197112	190694
$k_g = \frac{57,3(9 \dots 11) G_{кs} \cdot 10^{-3}}{a}$, Н/рад (7)	106696	91256	101003
Експериментальне значення k_g , Н/рад	110648	87860	105420

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – визначитись з методикою експериментального визначення коефіцієнта опору бічному відведенню з урахуванням конструктивних параметрів еластичних коліс, матеріальних та часових витрат.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На значення коефіцієнта k_g впливають конструктивні особливості шини, ураховуючи її призначення, навантаження, тиск повітря у шині та кут відведення, за якого експериментально визначався коефіцієнт опору бічному відведенню. Експериментальне визначення коефіцієнта k_g пов'язане зі значними труднощами визначення бічної сили під час руху колеса з кутом відведення на плоскій опорній поверхні. Аналіз літературних джерел [10, 13, 14] засвідчив, що визначення коефіцієнта опору бічному відведенню здійснюють двома способами:

– прямим способом, який полягає в експериментальному визначенні залежності бічної сили від кута відведення;

– побічним способом, який враховує функціональний зв'язок між розмірами контактної відбитка, кутовою жорсткістю шини відносно вертикальної осі, бічною жорсткістю шини та коефіцієнтом опору бічному відведенню під час руху колеса з відведенням.

За прямого способу як експериментальну установку використовують стенд або автомобіль. У разі використання стенда його можливості щодо шин вантажних автомобілів обмежені, тому дослідження проводять із шинами легкових автомобілів. Водночас стенди ризують особливостями опорної поверхні.

У барабанному стенді опорною поверхнею слугує металевий барабан, діаметр якого має перевищувати діаметр шини приблизно у 3,5 рази. Кут бічного відведення задається шляхом повороту диска колеса відносно вертикальної осі. Для шин вантажних автомобілів створення такого стенда потребує значних матеріальних і часових витрат. Окрім того, умови контакту шини з металевою поверхнею барабана відрізняються від умов на горизонтальній дорозі, що призводить до зміни тиску в зоні контакту та коефіцієнта зчеплення.

Стенди, у яких на горизонтальну поверхню спирається колесо, рух колеса відбувається по криволінійних траєкторіях з різними радіусами кривизни та кутами відведення [15, 16]. Радіус кривизни траєкторії повинен бути $R > a/0,2$, де a – приведена до рівновеликого прямокутника половина поздовжньої осі контактної відбитка шини. Фіксуються бічна сила, стабілізуючий момент шини, прикладена до стенда сила для забезпечення руху колеса при русі з різними кутами відведення та радіусами кривизни. Водночас габарити шин вантажних автомобілів та їх навантаження обмежують можливості створення таких стендів, а тому досліджуються шини легкових автомобілів.

Для визначення характеристик шин вантажних автомобілів виробники використовують автомобіль як експериментальну установку. Для цього клинами між балкою керованого моста та ресорами установлюється нульовий кут поздовжнього нахилу шворня. За знятої поперечної тяги фіксується праве кероване колесо спеціальним кронштейном, який закріплюється до балки мосту одним кінцем, а іншим – через шарову опору до поворотного важеля у конусний отвір кріплення знятої поперечної тяги. Зміною довжини кронштейна установлюється фіксований кут відведення. Прямолінійний рух автомобіля забезпечується поворотом лівого керованого колеса водієм під час руху. Методом тензометрування визначають стабілізуючий момент шини, що виникає під час руху з відведенням правого керованого колеса. Щодо бічної сили, яка виникає під час руху з відведенням, то між балкою керованого моста та передніми ресорами установлюються тензометричні проставки. Бічна сила, що виникає на керованих колесах під час руху з відведенням, сприймається тензометричними проставками. Переваги – використовується існуючий автомобіль, досліджуються шини, які установлені на автомобілі, дорога відповідає умовам, у яких експлуатується автомобіль. Однак, як показав аналіз проведених автором досліджень на вантажних автомобілях КамАЗ та КамАЗ, виникають проблеми зі створенням датчиків визначення бічної сили під час руху, швидкість руху обмежена.

Побічний метод ґрунтується на функціональному зв'язку, який існує між коефіцієнтом опору бічному відведенню, бічною жорсткістю шини, кутовою жорсткістю шини відносно вертикальної осі та поздовжньою віссю контактної відбитка під час руху по криволінійній траєкторії та під час плоско-паралельного з відведенням. Бічна жорсткість шини та кутова відносно вертикальної осі

визначаються на місці, що не викликає труднощів. Водночас коефіцієнт опору бічному відведенню визначається під час руху, що викликає значні труднощі.

Шину, до складу якої входить каркас, брекер, протектор, боковини, представляють як ціліснотільну модель. Вона є складовою частиною еластичного колеса, яка включає диск, шину, контактний відбиток шини, який одночасно належить шині та опорній поверхні. Характеристики такого механізму визначаються за загальними умовами класичної механіки. У цьому випадку розрізняють рух еластичного колеса по криволінійній траєкторії та плоско-паралельний рух з відведенням.

Під час руху колеса по криволінійній траєкторії диск колеса одночасно зміщується у бічному напрямку, що спричинює його рух з кінематичним кутом відведення, та повертається відносно відбитка за час проходження колесом шляху, що дорівнює половині поздовжньої осі контактного відбитка шини. У роботі [17] встановлено, що підведена до колеса енергія для забезпечення руху колеса з кінематичним кутом відведення та одночасним закрученням шини розподіляється в тілі шини порівну. Такий розподіл енергій можливий лише за виконання такої умови:

$$k_{\theta} = \frac{2C_{\theta}}{a}, \quad (8)$$

де C_{θ} – кутова жорсткість шини відносно вертикальної осі, Н·м/рад; k_{θ} – коефіцієнт опору бічному відведенню, Н/рад; a – поздовжня вісь контактного відбитка шини рівновеликого прямокутника, м.

Поздовжню вісь відбитка та кутову жорсткість шини визначають експериментально.

Кутову жорсткість шини визначають експериментально під час повороту заблокованого керованого колеса на місці з фіксацією кута повороту колеса та моменту відносно вертикальної осі. Для його визначення як експериментальну установку використовують автомобіль. Від'єднують поперечну тягу від лівого керованого колеса та встановлюють клинами між балкою моста та ресорами нульове значення кута поздовжнього нахилу шворня. Кермовим керуванням водій повертає ліве заблоковане кероване колесо. Для визначення тертя у підшипниках шворневого вузла та вагового стабілізуючого моменту від поперечного нахилу шворня колесо встановлюють на самоцентрувальну площадку.

Визначення жорсткості шини проводять під час повороту у межах до 0,08 рад на опорній поверхні з високим коефіцієнтом зчеплення. Ураховують, що у контактному відбитку шини наявні тільки зони зчеплення, а залежність між моментом опору повороту шини та кутом повороту у цих межах кута умовно лінійна. Відносно кутової жорсткості шини, то значення кутів закручування шини під час визначення жорсткості повною мірою відповідають кутам відведення під час визначення коефіцієнта опору бічному відведенню.

За відсутності експериментальних даних у роботах [3, 12] рекомендується визначати жорсткість шини за емпіричною залежністю:

$$C_{\theta} = 57,3(9 \dots 11)G_k \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

де C_{θ} – кутова жорсткість шини, Н·м/рад; G_k – навантаження на колесо, Н.

Із певною достовірністю коефіцієнт опору бічному відведенню з урахуванням (8), (9) розраховують так:

$$k_{\theta} = \frac{57,3(9 \dots 11)G_k \cdot 10^{-3}}{a}, \text{ Н/рад.}$$

Вище розглянуто функціональний зв'язок між коефіцієнтом опору бічному відведенню з кутовою жорсткістю шини та поздовжньою віссю контактного відбитка під час руху по криволінійній траєкторії.

Розглянемо плоско-паралельний рух колеса з відведенням, який пов'язаний з бічним зміщенням диска відносно відбитка шини. У разі дії на нерухоме колесо бічної сили вона спричинює зміщення відбитка шини відносно диска колеса. Під час руху ця сила зумовлює поворот контактний відбитка відносно диска колеса на кут відведення. Водночас поворот відбитка здійснюється відносно початкової точки контакту. Схему для визначення зміщення відбитка шини під час дії бічної сили наведено на рис. 1.

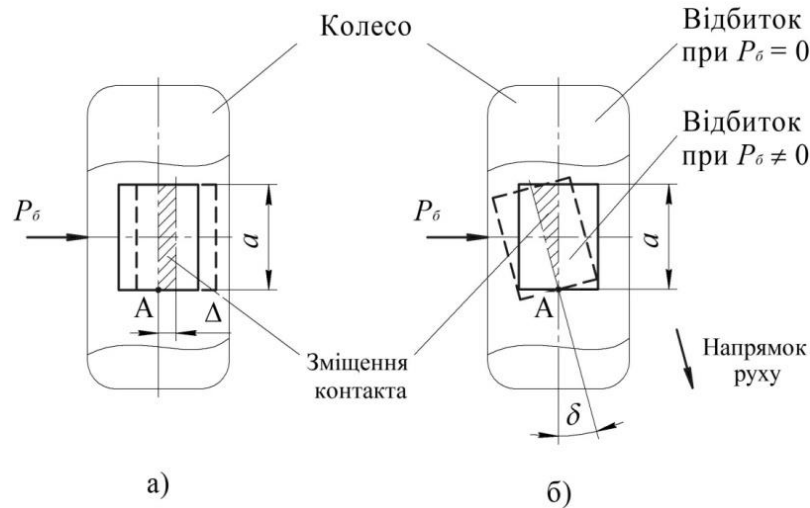


Рисунок 1 – Схема для визначення зміщення відбитка під час дії бічної сили а) на місці; б) під час руху

Із аналізу рис. 1 видно, що відбиток шини являє собою прямокутник з поздовжньою стороною a . Суцільною лінією зображено його положення за відсутності дії бічної сили. Під час дії бічної сили на колесо положення відбитка відносно колеса зображено штриховою лінією.

У разі дії на колесо бічної сили P_δ на місці (рис. 1а) відбувається відносно бічне зміщення відбитка шини на величину Δ , яку визначимо так:

$$\Delta = \frac{P_\delta}{k_s}, \quad (10)$$

де k_s – бічна жорсткість шини, Н/м; Δ – бічне зміщення відбитка під час дії бічної сили на місці, м.

Зміщення контакту колеса з опорною поверхнею зображено заштрихованим прямокутником (рис. 1а), одна сторона якого – поздовжня вісь відбитка, а інша – зміщення Δ .

Під час руху колеса, на яке діє бічна сила P_δ , відбувається поворот відбитка відносно початку контакту, точки А (рис. 1 б), на кут відведення δ . Величину цього кута визначимо за виразом:

$$\delta = \frac{P_\delta}{k_B}, \quad (11)$$

де k_B – коефіцієнт опору бічному відведенню, Н/рад.

У цьому випадку зміщення контакту колеса являє собою заштрихований трикутник, один катет якого – це поздовжня вісь контактної відбитка a , а інший, урахувавши залежність (11), – aP_δ/k_B .

Під час дії на колесо бічної сили виконується робота, яка пропорційна заштрихованим зміщенням контактної відбитка. На місці цю площу визначимо так:

$$S_{V=0} = a \frac{P_\delta}{k_s},$$

де $S_{V=0}$ – площа зміщення відбитка на місці, м².

Під час руху площа зміщення відбитка – це трикутник, яку визначимо за виразом:

$$S_{V \neq 0} = \frac{a^2 P_\delta}{2k_B},$$

де $S_{V \neq 0}$ – площа зміщення відбитка під час руху, м².

На підставі закону збереження енергії можна порівняти ці дві роботи:

$$a \frac{P_\delta}{k_s} = \frac{a^2 P_\delta}{2k_B}. \quad (12)$$

Із аналізу виразу (12) визначимо коефіцієнт опору бічному відведенню за виразом:

$$k_B = \frac{ak_s}{2}. \quad (13)$$

Із аналізу виразу (8), (13), визначимо кутову жорсткість шини так:

$$C_\theta = \frac{k_s a^2}{4}. \quad (14)$$

Отже, коефіцієнт опору бічному відведенню та кутову жорсткість шини можна визначити, знаючи бічну жорсткість шини й поздовжню вісь контактного відбитка. Отримані залежності (13), (14) дозволяють визначити ці параметри шини за умови відсутності ковзання у контактному відбитку. На сухому асфальтобетоні, із достатньою для практичних розрахунків точністю, беруть значення коефіцієнта опору бічному відведенню та кутову жорсткість постійними для шин вантажних автомобілів у межах до 5° . Для визначення бічної жорсткості шини на сухому асфальтобетоні максимальна бічна сила не повинна перевищувати $0,1G_k$, де G_k – навантаження на колесо.

Для підтвердження достовірності залежностей (13), (14) були проведені стендові та дорожні випробування. Стендові випробування проводили на стенді [18], на якому установлені широкопрофільні шини 1300x530-533 мод. ВИД-201 та на повнопривідному автомобілі КрАЗ-255Б із цими шинами. Схему експериментального визначення бічної жорсткості шини наведено на рис. 2.

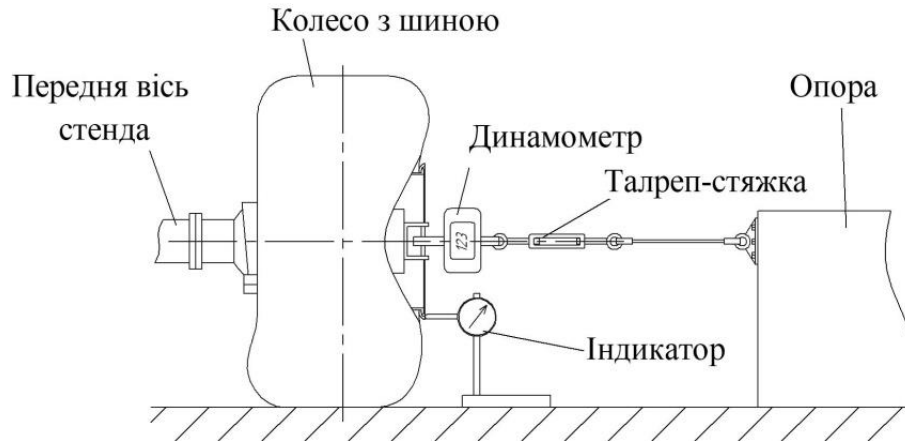


Рисунок 2 – Схема визначення бічної жорсткості шини

Навантаження на колесо складало 27 кН, тиск у шині установлювався 0,4; 0,2; 0,1 МПа. Бічне зусилля створювалось галреп-стяжкою, один кінець якої кріпився до динамометра, а інший – до нерухої опори. Динамометр з допустимим зусиллям 10000 Н закріплювався під болти фланця напівосі. Зміщення диска колеса вимірювалось індикатором годинникового типу з точністю 0,01 мм та діапазоном вимірювання 0-10 мм. Індикатор установлювався на стійці та упирался в диск колеса.

Результати експериментальних досліджень бічної жорсткості шини 1300x530-533 мод. ВИД-201 наведено на рис. 3.

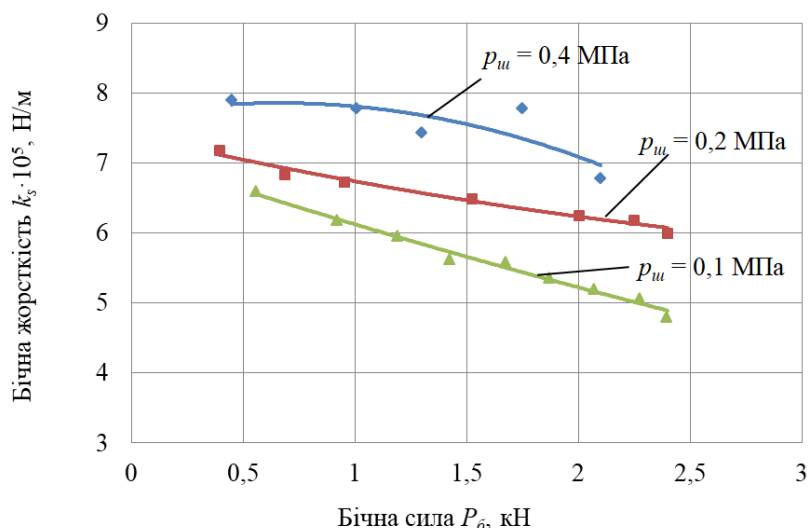


Рисунок 3 – Залежність бічної жорсткості шини 1300x530-533 мод. ВИД-201 від бічної сили

Із аналізу рис. 3 видно, що зменшення тиску у шині зменшує бічну жорсткість. У міру збільшення навантаження бічна жорсткість шини зменшується, що пояснюється появою зон ковзання на краях контактної відбитка. У межах зміни бічної сили до $0,1G_k$ середнє значення бічної

жорсткості склало: $p_{ui} = 0,4$ МПа $k_s = 748900$ Н/м; $p_{ui} = 0,2$ МПа $k_s = 654320$ Н/м; $p_{ui} = 0,1$ МПа, $k_s = 558700$ Н/м.

Були проведені експериментальні дослідження та визначена кутова жорсткість шини та коефіцієнт опору бічному відведенню на автомобілі КраЗ-255Б.

Результати експериментальних та розрахованих за виразами (13) та (14) даних наведено на рис. 4, 5 та у табл. 2.

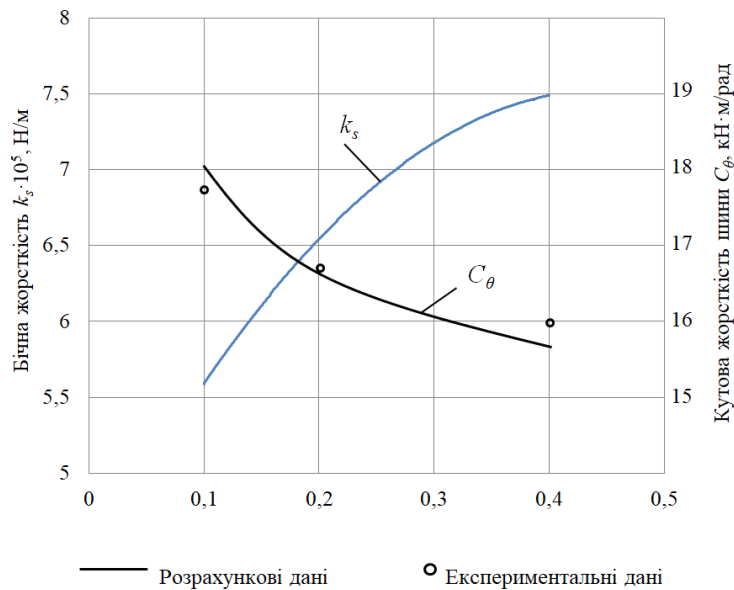


Рисунок 4 – Залежність бічної жорсткості k_s та кутової жорсткості шини C_θ від тиску повітря p_{ui}

На рис. 4 наведено експериментальну криву бічної жорсткості шини k_s та розраховану за виразом (14) залежність кутової жорсткості C_θ від тиску повітря p_{ui} . Експериментальні дані C_θ представлені дискретно. Із аналізу рис. 4 видно, що експериментальні дані кутової жорсткості збігаються з розрахованими, які отримані через бічну жорсткість та поздовжню вісь відбитка шини. Наведене підтверджує достовірність висунутої гіпотези про рівність робіт, зумовлених дією бічної сили на місці та підчас руху.

Із пониженням тиску повітря в шині бічна жорсткість шини зменшується, а кутова відносно вертикальної осі збільшується.

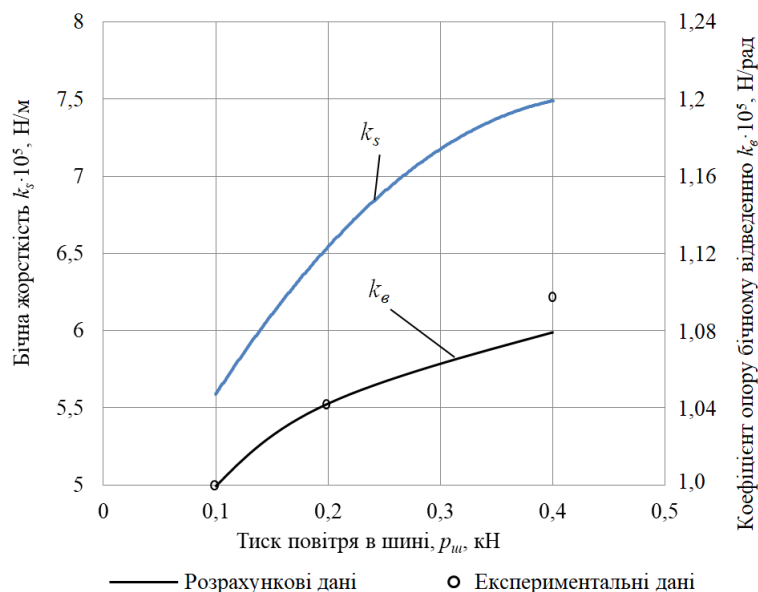


Рисунок 5 – Залежність бічної жорсткості шини k_s та коефіцієнта опору бічному відведенню k_g від тиску повітря p_{ui}

Із аналізу рис. 5 видно, що з підвищенням тиску коефіцієнт опору бічному відведенню збільшується, що підтверджується результатами проведених досліджень мінімального радіуса повороту. Було встановлено, що зниження тиску повітря у шинах візка на автомобілі КрАЗ-255Б призвело до зменшення мінімального радіуса повороту. Відповідність розрахованих за виразом (13) значень коефіцієнта опору бічному відведенню за експериментальними даними бічної жорсткості та поздовжньої осі контактної відбитка підтверджує достовірність розробленої методики.

У табл. 2 подано зведені результати розрахункових та експериментальних даних, отриманих для шини 1300x530-533 мод. ВИД-201.

Таблиця 2 – Результати дослідження достовірності розробленої методики визначення коефіцієнта опору бічному відведенню

p_w , МПа	0,1	0,2	0,4
a , м	0,36	0,32	0,29
k_s , Н/м (експ.)	558700	654320	748900
k_θ , Н/рад (13)	100556	104691	108590
k_θ , Н/рад (експ.)	98683	104575	110640
C_θ , Н·м/рад (14)	18102	16750	15746
C_θ , Н·м/рад (експ.)	17763	16732	16044

Із аналізу табл. 2 видно, що при тиску повітря у шині $p_w = 0,4$ МПа експериментальне значення коефіцієнта опору бічному відведенню становить 110648 Н/рад, розраховане за виразом (13) значення – 108590 Н/рад. Похибка складає 1,85 %.

Отже, між пружними характеристиками еластичного колеса існує функціональний зв'язок, на якому ґрунтується розроблена методика визначення коефіцієнта опору бічному відведенню.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропонована в роботі методика визначення коефіцієнта опору бічному відведенню ґрунтується на функціональному зв'язку цього коефіцієнта з бічною жорсткістю та поздовжньою віссю відбитка шини, які визначаються експериментально. Отримані аналітичні залежності, що визначають цей функціональний зв'язок, розглядаючи шину як складову частину еластичного колеса. Колесо містить диск, шину й контактний відбиток та розглядається у роботі як цілісний механізм, який досліджується з використанням загальних положень класичної механіки.

ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень отримуємо такі висновки:

1. Запропонована у роботі методика визначення коефіцієнта опору бічному відведенню побічним способом ґрунтується на отриманих у роботі аналітичних залежностях, які пов'язують коефіцієнт опору бічному відведенню з бічною жорсткістю шини та поздовжньою віссю відбитка шини.

2. Шина, яка складається з каркаса, брекера, протектора та боковин, у роботі розглядається як цілісне тіло та є складовою частиною еластичного колеса. Водночас еластичне колесо подано у роботі як цілісний механізм, а його властивості визначаються за загальними положеннями класичної механіки.

3. Встановлено, що під час руху по криволінійній траєкторії диск відносно відбитка шини зміщується у бічному напрямку та повертається відносно вертикальної осі. Бічне зміщення спричинює рух колеса з кінематичним кутом відведення, а поворот – момент закручування шини. У разі плоско-паралельного руху з відведенням диск колеса зміщується відносно відбитка шини, що спричинює бічну силу.

4. Визначено, що на місці під час дії на колесо бічної сили контактний відбиток шини зміщується у бічному напрямку. Зміщення являє собою прямокутник зі сторонами: довжина контакту та бічне зміщення, яке залежить від прикладеної сили та бічної жорсткості шини. Унаслідок дії на колесо бічної сили під час руху контактний відбиток повертається відносно початкової точки

контакту з опорною поверхнею. Зміщення являє собою трикутник, один катет якого є довжиною контактної відбитку, а другий залежить від величини прикладеної бічної сили та коефіцієнта опору бічному відведенню.

5. Для визначення характеристик еластичного колеса розроблено методику проведення експериментальних досліджень, згідно з якою як тестер використовують автомобіль. У цьому випадку визначаються пружні характеристики шин, якими обладнаний автомобіль заводом-виробником.

6. Установлено, що з пониженням тиску у шині 1300x530-533 мод. ВИД-201 бічна жорсткість та коефіцієнт опору бічному відведенню зменшуються. Зменшення коефіцієнта опору бічному відведенню підтверджується зменшенням мінімального радіуса повороту повнопривідного автомобіля КрАЗ-255Б, обладнаного шинами 1300x530-533 мод. ВИД-201, унаслідок пониження тиску повітря у шинах коліс візка.

7. Проведений аналіз експериментальних та розрахункових даних показав їх відповідність, що підтверджує достовірність представленої методики визначення коефіцієнта опору бічному відведенню.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Nakajima Y. Advanced tire mechanics. Singapore: Springer Nature, 2019. 1265 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2>.
2. S. Yamazaki, in Study on Spring Characteristics of Radial Tires (in Japanese), Ph. D. Thesis, (Chuo University, 1987).
3. Солтус А. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля. Київ : Арістей, 2010. 155 с.
4. Guiggiani M. The science of vehicle dynamics. Pisa, Italy: Springer Netherlands, 2014. 15, 32.
5. Gillespie T. (Ed.). Fundamentals of vehicle dynamics. SAE international, 1992.
6. Pereira, C. L., da Costa Neto, R. T., & Loiola, B. R. Cornering stiffness estimation using Levenberg–Marquardt approach. Inverse Problems in Science and Engineering. 2021. 29(12). P. 2207–2238. <https://doi.org/10.1080/17415977.2021.1910683>.
7. Pauwelussen J. The Essentials of Vehicle Dynamics. Butterworth-Heinemann: Oxford, UK. 2014. P. 309.
8. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles – 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 528 p.
9. Jazar R. N. Vehicle dynamics (Vol. 1). New York : Springer, 2008. 1022 p.
10. Pacejka H. B. Theory of Steady-State Slip Force and Moment Generation. In: Tire and Vehicle Dynamics, 2012. P. 87–147. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097016-5.00003-6>.
11. Rakicevic Branislav B., Sasa R. Mitic, Dragan D. Stamenkovic. Determination of cornering stiffness through integration of a mathematical model and real vehicle exploitation parameters. FME Transactions. 2013. 41.1. P. 66-71.
12. Mateichyk V., Soltus A., Klimov E., Kostian N., Smieszek M., Kovbasenko S. Regularities of Changes in the Motion Resistance of Wheeled Vehicles along a Curvilinear Trajectory. *Machines*. 2023. 11. P. 570.
13. Loeb J.S., Guenther D., Chen H.F., Ellis, J.R. Lateral stiffness, cornering stiffness and relaxation length of the pneumatic tire. *SAE transactions*. 1990. 99. P. 147-155.
14. Blundell M., Harty D. The multibody systems approach to vehicle dynamics. *Elsevier*. 2004.
15. Pacejka H. B. Spin: camber and turning. *Vehicle System Dynamics*, 2005. 43 (sup1). P. 3–17. <https://doi.org/10.1080/00423110500140013>.
16. Стенд для дослідження роботи колеса з пневматичною шиною : пат. 150997 Україна: G01L5/13(2006.01). № u 2022 00032; заявл. 14.01.2022; опубл. 18.05.2022, Бюл. № 20. 4 с.
17. Солтус А. П., Тарандушка Л. А., Клімов Е. С., Черненко С. М. Особливості руху еластичного колеса по криволінійній та прямолінійній траєкторії з відведенням. Вісник машинобудування та транспорту. 2021. № 2 (14). С. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-121-130>.
18. Стенд для дослідження роботи керованого колеса з пневматичною шиною : пат. 59873 Україна: G01L5/13. № u 2010 08105; заявл. 29.06.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11. 4 с.

REFERENCES

1. Nakajima, Y. (2019). Advanced tire mechanics. Singapore: Springer Nature. 1265 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2>.

2. S. Yamazaki, in Study on Spring Characteristics of Radial Tires (in Japanese), Ph. D. Thesis, (Chuo University, 1987).
3. Soltus, A.P. (2010). Teorija eksploatacijnyh vlastyvostej avtomobilja [Theory of operational properties of the vehicle]. Kyi'v : Aristej [in Ukrainian].
4. Guiggiani, M. (2014). The science of vehicle dynamics. Pisa, Italy: Springer Netherlands, 15, 32.
5. Gillespie, T. (Ed.) Fundamentals of Vehicle Dynamics; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1992; 526 p.
6. Pereira, C. L., da Costa Neto, R. T., & Loiola, B. R. (2021). Cornering stiffness estimation using Levenberg–Marquardt approach. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 29(12), 2207–2238. <https://doi.org/10.1080/17415977.2021.1910683>.
7. Pauwelussen, J. (2014). The Essentials of Vehicle Dynamics; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK. 309p.
8. Wong, J.Y. Theory of Ground Vehicles, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2001; 528p.
9. Jazar, R. N. (2008). Vehicle dynamics (Vol. 1). New York : Springer.
10. Pacejka, H. B. (2012). Tire characteristics and vehicle handling and stability (pp. 1-58). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
11. Vorotović, Goran & Rakicevic, B.B. & Mitić, Saša & Stamenković, Dragan. (2013). Determination of cornering stiffness through integration of a mathematical model and real vehicle exploitation parameters. *FME Transactions*, 41, 66-71.
12. Mateichyk, V., Soltus, A., Klimov, E., Kostian, N., Smieszek, M. & Kovbasenko, S. Regularities of Changes in the Motion Resistance of Wheeled Vehicles along a Curvilinear Trajectory. (2023). *Machines*, 11(5), 570.
13. Loeb, J.S., Guenther, D., Chen, H.F., & Ellis, J.R. (1990). Lateral stiffness, cornering stiffness and relaxation length of the pneumatic tire. *SAE transactions*, 99, 147-155.
14. Blundell, M., & Harty, D. (2004). The multibody systems approach to vehicle dynamics. Elsevier.
15. Pacejka H. B. Spin: camber and turning. *Vehicle System Dynamics*, 2005. 43 (sup1). P. 3–17. <https://doi.org/10.1080/00423110500140013>.
16. Klimov, E.S., Soltus, A. P., Pylypenko, V. I. Stend dlia doslidzhennia roboty kerovanoho koleasa z pnevmatychnoiu shynoiu [Experimental bench for researching the operation of a wheel with a pneumatic tire] Patent UA, no. u 2022 00032, 2022.
17. Soltus, A. P., Tarandushka, L.A., Klimov, E.S., Chernenko, S.M. (2021). Osoblyvosti ruhu elastychnogo koleasa po kryvolinijnij ta prjamolinijnsj trajektorii' z vidvedennjam [Features of an elastic wheel motion along a curvilinear and rectilinear trajectory with a slip]. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2 (14), 121-130 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-121-130>.
18. Soltus, A. P., Klimov, E.S. Stend dlia doslidzhennia roboty kerovanoho koleasa z pnevmatychnoiu shynoiu [Experimental bench for researching the operation of a steered wheel with a pneumatic tire] Patent UA, no. u 2010 08105, 2011.

Soltus A.P., Klimov E.S., Tarandushka L.A. Cornering stiffness determination

Existing methods are analyzed and the results of experimental studies on determining the cornering stiffness on an undeformed support surface are presented. When studying the cornering stiffness, the tire is considered as a component of an complex mechanism, which is an elastic wheel. At the same time, a distinction is made between the movement of the wheel along a curvilinear trajectory and the plane-parallel movement with slip. During the movement of the wheel along a curvilinear trajectory, the disk is simultaneously displaced laterally and twisted relative to the tire contact patch, which causes a lateral force and a twisting moment relative to the vertical axis. The plane-parallel movement of the wheel with slip causes a lateral displacement of the disk relative to the tire contact patch, which causes a lateral force that is displaced relative to the center of the tire contact patch. Both the movement along a curvilinear trajectory and the plane-parallel movement with slip are associated with a lateral force that depends on the cornering stiffness. It is proposed to experimentally determine the cornering stiffness of truck tires, using the truck as a tester. Analytical dependencies are presented that functionally link the cornering stiffness, lateral stiffness of the tire, angular stiffness relative to the vertical axis and the longitudinal axis of the contact patch. These dependencies allow determining cornering stiffness by the indirect method. The results of experimental and calculated data of the cornering stiffness for a tire size 1300x530-533 mod. VID-201, which is installed on all-wheel drive KrAZ truck, are presented.

The results of the research may be useful to specialists working on improving the handling and stability of vehicles.

Key words: cornering stiffness, slip angle, lateral stiffness, tire contact patch, methodology, undeformed support surface.

СОЛТУС Анатолій Петрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, e-mail: auto.soltus@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6010-1124>

КЛІМОВ Едуард Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського e-mail: edward.klimov@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2662-2401>

ТАРАНДУШКА Людмила Анатоліївна, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, e-mail: tarandushkal@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-1410-9088>

Anatolii SOLTUS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Cars and Technologies of their Operation Department, Cherkasy State Technological University, e-mail: auto.soltus@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6010-1124>

Eduard KLIMOV, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Automobiles and Tractors Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: edward.klimov@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2662-2401>

Ludmyla TARANDUSHKA, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Cars and Technologies of their Operation Department, Cherkasy State Technological University, e-mail: tarandushkal@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-1410-9088>

Дата надходження статті до видання: 27.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1937

Сістук В.О.
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ПОПИТУ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІСТІ КРИВИЙ РІГ

У роботі розроблений підхід до моделювання генерації попиту (кількості поїздок) на вантажному автомобільному транспорті у 4-етапній моделі розрахунку попиту. Даний підхід полягає у тому, що: 1.) міській вантажний автотранспорт розглядається у складі трьох відокремлених систем: легких вантажних автомобілів довжиною від 2,0 до 2,6 м з двома або більше двох осей вантажопідйомністю до 2 т, середніх трьохосних вантажних автомобілів довжиною більше 2,6 м вантажопідйомністю від 2 до 8 т та трьохосних самоскидів вантажопідйомністю більше 8 т. 2.) у процедурах утворення та притягнення поїздок у якості структурних показників використовується кількість робочих місць як атрибут транспортних районів розподілена відповідно до конкретного для кожної із систем вантажного автотранспорту набору видів економічної активності. Для перевірки даного підходу проведено моделювання генерації попиту на вантажному автотранспорті у транспортній моделі міста Кривий Ріг у програмному забезпеченні PTV Visum. Результати моделювання показали, що кількість поїздок, які утворюються та притягуються різними транспортними районами міста, збігається, що підтверджує коректність обраного підходу до розрахунку генерації поїздок для визначених систем вантажного транспорту. Встановлено, що формування та поглинання поїздок на міському вантажному автотранспорті в Кривому Розі значно переважає в порівнянні з іншими транспортними районами моделі в шести районах, де розташовані підприємства гірничо-металургійного комплексу, які отримали назву гірничопромислових при попередніх дослідженнях міської мобільності Кривого Рогу (на пасажирському транспорті). Подальші дослідження будуть присвячені іншим процедурам розрахунку транспортного попиту в рамках 4-етапної транспортної моделі.

Ключові слова: транспортний попит, вантажний автомобільний транспорт, транспортна система, транспортне моделювання, PTV Visum, генерація попиту, утворення поїздок, притягнення поїздок, транспортний район, гірничопромисловий район.

ВСТУП

Ефективна міська система вантажного транспорту забезпечує своєчасне постачання товарів, дозволяє знижувати витрати та покращувати рівень транспортного обслуговування як для бізнесу, так і для кінцевих споживачів [1]. Розвиток міських територій зазвичай супроводжується збільшенням обсягів вантажних перевезень, що створює виклики для транспортної системи. Неоптимізовані транспортно-логістичні процеси призводять до втрат часу, підвищеного споживання пального транспортними засобами, погіршення екологічної ситуації та підвищення витрат на транспортування [2, 3]. Таким чином, у сучасних умовах та зростаючих викликів міська мобільність і вантажні перевезення вимагають нових підходів та технологій для вивчення, спрямованих на досягнення ефективності та сталого розвитку.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Закономірності формування попиту на перевезення вантажів автомобільним транспортом у сучасних умовах визначаються на основі результатів транспортного моделювання [4].

Для оптимізації вантажних перевезень важливе застосування сучасних методів моделювання, зокрема алгоритмічних моделей машинного навчання [5], лінійних [6, 7] та імітаційних моделей [8]. Використання штучного інтелекту, аналітики великих даних [9] також відкриває нові можливості для управління системами вантажного автотранспорту.

Багато концепцій моделювання, застосовуваних для прогнозування вантажних перевезень, були спочатку розроблені для пасажирських перевезень. Зокрема, знаходить підтвердження підхід [10], який полягає у тому, що 4-етапна транспортна модель для пасажирських перевезень може бути ефективно адаптована для моделювання вантажних перевезень. Вантажні перевезення мають певні спільні риси з пасажирськими, зокрема через використання спільної дорожньо-транспортної мережі як для пасажирських, так і для вантажних автотранспортних засобів, що дозволяє застосовувати модифіковані моделі пасажирських перевезень для аналізу вантажних перевезень.

Однак варто зазначити, що існують суттєві відмінності між пасажирськими та вантажними перевезеннями, які впливають на генерацію транспортного попиту, що має враховуватись при розробці відповідних транспортних моделей [11]. Вантажні перевезення включають більше

зацікавлених сторін (відправники, перевізники, водії, оператори). Тип вантажу варіюється від малих посилок до великих партій, що вимагає різних підходів до транспортування, через конфіденційність часто бракує детальних даних для моделювання вантажних перевезень, вантажі потребують спеціальної інфраструктури для навантаження і вивантаження, вантажні транспортні засоби можуть бути спеціалізованими, тобто розробленими для конкретних типів вантажів, на маршрут вантажу впливають кілька учасників перевізного процесу від відправника до отримувача, мережа вантажного транспорту може включати власні вузли (логістичні центри, склади), що мають окремі характеристики щодо пропускної здатності та часу затримки, умови перевезень характеризуються високим ступенем невизначеності [10, 11].

У роботах [10, 11] відзначається, що моделювання процесу прийняття рішень при здійсненні вантажних перевезень ускладняється порівняно із моделюванням попиту на пасажирському транспорті взаємодією між учасниками перевізного процесу. В деяких випадках враховується проходження вантажними транспортними засобами вузлових точок мережі, що впливає на вибір маршруту та перерозподіл транспортного попиту. У роботі [11] зазначено, що на останньому етапі перерозподілу транспортного попиту на вантажні перевезення (призначення) доцільно застосовувати ті ж методи перерозподілу, що й для моделі пасажирського транспорту, оскільки обидві системи транспорту використовують однакову дорожню інфраструктуру. Останнє обумовлює необхідність одночасного розрахунку попиту на вантажні та пасажирські перевезення в межах однієї моделі.

Автори [12] відзначають, що моделювання попиту на вантажні перевезення завжди має чітку прив'язку до конкретних умов дорожньої мережі, рухливості населення, економічної активності, тому існуючі підходи та алгоритми до визначення закономірностей формування попиту на перевезення вантажним транспортом мають враховувати локальні фактори впливу. При моделюванні генерації попиту на вантажні перевезення мають бути враховані не тільки спостережувані вихідні дані, а й неспостережувані дані щодо характеристик ланцюгів постачань у системах вантажного транспорту [13].

У зв'язку з вищенаведеним, актуальним завданням є розроблення підходу до розрахунку генерації попиту (кількості поїздок) як першого етапу 4 крокової моделі попиту із реалізацією на прикладі транспортної моделі міста Кривий Ріг.

Для виконання поставленого завдання необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити підхід до процедури розрахунку генерації попиту на вантажні перевезення автомобільним транспортом для різних систем вантажного транспорту;
- реалізувати розроблені процедури за допомогою транспортної моделі міста Кривий Ріг;
- використати результати транспортного моделювання, провівши оцінку отриманих закономірностей генерації попиту на вантажні перевезення у місті Кривий Ріг.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Генерація попиту на міському вантажному автомобільному транспорті розглядається для трьох систем транспорту:

FT1 – легкі вантажні автомобілі довжиною від 2,0 до 2,6 м з двома або більше двох осей вантажопідйомністю до 2 т;

FT2 – середні трьохосні вантажні автомобілі довжиною більше 2,6 м вантажопідйомністю від 2 до 8 т;

FT3 – трьохосні самоскиди вантажопідйомністю більше 8 т.

Генерація транспортного попиту передбачає взаємозалежні процеси утворення поїздок з відповідних районів транспортної моделі та притягнення поїздок у дані райони [7].

На етапі утворення транспортного попиту продукування кількості поїздок для відповідного транспортного району залежить від структурних показників, які описують інтенсивність економічної діяльності в даному районі:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ift1} &= \sum_l V_{li} \cdot a_{pi} \\ Q_{ift2} &= \sum_m V_{mi} \cdot b_{pi} \\ Q_{ift3} &= \sum_h V_{hi} \cdot c_{pi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Q_{ift1} , Q_{ift2} , Q_{ift3} – кількість поїздок, які утворюються вантажовідправниками транспортного району i для систем вантажного транспорту $FT1$, $FT2$ та $FT3$ відповідно;

V_{li}, V_{mi}, V_{hi} – обсяг генерації в транспортному районі i одиниці p , яка залежить від структурного показника l, m, h у різних системах транспорту $FT1, FT2$ та $FT3$;

a_{pi}, b_{pi}, c_{pi} – коефіцієнти утворення, які описують кількість поїздок, що припадають на одиницю відповідного структурного показника.

Притягнення поїздок у транспортному районі j можна визначити наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} A_{jft1} &= \sum_l P_{lj} \cdot d_{sj} \\ A_{jft2} &= \sum_m P_{mj} \cdot e_{sj} \\ A_{jft3} &= \sum_h P_{hj} \cdot f_{sj} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$A_{jft1}, A_{jft2}, A_{jft3}$ – кількість поїздок, які притягуються вантажоодержувачами транспортного району j для систем вантажного транспорту $FT1, FT2$ та $FT3$ відповідно;

P_{lj}, P_{mj}, P_{hj} – обсяги притягнення поїздок в транспортному районі j одиниці s , які залежать від структурного показника l, m, h у різних системах транспорту $FT1, FT2$ та $FT3$;

d_{sj}, e_{sj}, f_{sj} – коефіцієнти притягнення, які описують кількість поїздок, що припадають на одиницю відповідного структурного показника.

Балансування утворення та притягнення кількості поїздок передбачає, що сума поїздок, які генеруються, дорівнює сумі поїздок, які притягуються. В якості основи для балансування доцільно використовувати ітераційну процедуру, в якій використовуються середні значення кількості поїздок утворення та притягнення. При такому підході вантажопотік визначатиметься:

$$\left. \begin{aligned} F_{ijk}(n+1) &= F_{ijk}(n) \cdot \frac{Q_{ik}}{\sum_j F_{ij} \cdot \frac{A_{jk}}{A_{jk}(n)}} \cdot \frac{A_{jk}}{\sum_i F_{ij} \cdot \frac{Q_{ik}}{Q_{ik}(n)}} \cdot \frac{G_k}{G_k(n)} \\ \left| \frac{Q_{ik}(n)}{Q_{ik}} - 1 \right| &\leq \xi; \quad \left| \frac{A_{jk}(n)}{A_{jk}} - 1 \right| \leq \xi; \quad \xi = \frac{1}{f_q \cdot \sqrt{Q_{ik}}}; \quad \xi = \frac{1}{f_q \cdot \sqrt{A_{jk}}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

F_{ijk} – розрахована кількість поїздок із району i в район j у системі вантажного транспорту k ;

$F_{ijk}(n)$ – розрахована кількість поїздок із району i в район j на ітерації n у системі вантажного транспорту k ;

Q_{ik} – бажана кількість поїздок із транспортного району i в системі вантажного транспорту k ;

$Q_{ik}(n)$ – кількість поїздок із транспортного району i на ітерації n в системі вантажного транспорту k ;

A_{jk} – бажана кількість поїздок в транспортний район j в системі вантажного транспорту k ;

$A_{jk}(n)$ – кількість поїздок в транспортний район j на ітерації n в системі вантажного транспорту k ;

G_k – сумарна кількість поїздок в системі вантажного транспорту k ;

$G_k(n)$ – сумарна кількість поїздок в системі вантажного транспорту k на ітерації n ;

ξ – гранична величина поїздок утворення-притягнення;

f_q – коефіцієнт якості за методом Лоз'є (приймається рівним 3) [14];

n – номер ітерації;

k – номер системи транспорту $FT1, FT2, FT3$.

Для моделювання використано мережу транспортної моделі міста Кривий Ріг, створену за допомогою програмного забезпечення PTV Visum [14]. Описання транспортної мережі, моделі попиту на пасажирський транспорт та моделі взаємодії, які розроблені в рамках моделювання, наведено у роботі [15]. У якості шарів попиту на етапі розрахунку моделі, що розглядається, виступає взаємодія кожної системи транспорту $FT1, FT2$ та $FT3$ із внутрішніми цілями поїздок, тобто внутрішній попит.

Утворення та притягнення поїздок у моделі вантажного транспорту міста Кривий Ріг здійснювалось з використанням таких підходів. У якості структурного показника прийнята кількість робочих місць у відповідному транспортному районі відповідно до класифікації видів економічної активності (КВЕД) [16]. У якості коефіцієнтів утворення a_{pi} , b_{pi} , c_{pi} та притягнення d_{sj} , e_{sj} , f_{sj} в рівняннях (1-2) наступні величини:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ift1} = A_{jft1} &= 0,115 \cdot w_1 + 0,07 \cdot w_2 + 0,05 \cdot w_3 \\ Q_{ift2} = A_{jft2} &= 0,015 \cdot w_1 + 0,05 \cdot w_2 + 0,02 \cdot w_3 \\ Q_{ift2} = A_{jft2} &= 0,04 \cdot w_1 + 0,025 \cdot w_2 + 0,002 \cdot w_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

w_1 – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі i (для утворення потоку) або j (для потоків притягнення) за КВЕД А, В, F;

w_2 – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі i (для утворення потоку) або j (для потоків притягнення) за КВЕД С, D, E, I, G, H;

w_3 – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі i (для утворення потоку) або j (для потоків притягнення) за КВЕД J, K, L, M, N, O, P, Q.

Значення коефіцієнтів визначалось на основі балансування попиту за формулою (4).

Утворення добової кількості поїздок транспортних районів для систем вантажного транспорту $FT1$, $FT2$ та $FT3$ для міста Кривий Ріг показано на Рисунку 1, а притягнення поїздок – на Рисунку 2. Кількість поїздок, які утворюються та притягуються в транспортних районах Інгульця за добу, для зручності показані на окремих діаграмах (Рисунок 3, Рисунок 4), оскільки даний мікрорайон географічно віддалений від інших частин міста.

Отримані результати показують, що у транспортній моделі дотримується баланс утворення та притягнення кількості поїздок вантажним автомобільним транспортом для всіх прийнятих транспортних систем. Центрами генерації поїздок по всім системам є гірничопромислові райони міста (Таблиця 1) [15], які розташовані або примикають до підприємств гірничо-металургійного комплексу: ПрАТ Інгулецький гірничозбагачувальний комбінат (ГЗК), ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг, ПрАТ Центральний ГЗК, ПрАТ Північний ГЗК. Дані райони із показниками генерації поїздок представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Центри генерації (утворення/притягнення) поїздок вантажного автотранспорту

№ з/п	Адміністративний район міста	Підприємство гірничопромислового району	Система вантажного транспорту та кількість поїздок за добу, одиниць		
			$FT1$	$FT2$	$FT3$
1	Інгулецький	ПрАТ Інгулецький ГЗК	768	116	250
2	Інгулецький	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	286	41	102
3	Інгулецький	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	564	76	194
4	Металургійний	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	637	91	228
5	Покровський	ПрАТ Центральний ГЗК	603	81	209
6	Тернівський	ПрАТ Північний ГЗК	875	115	305

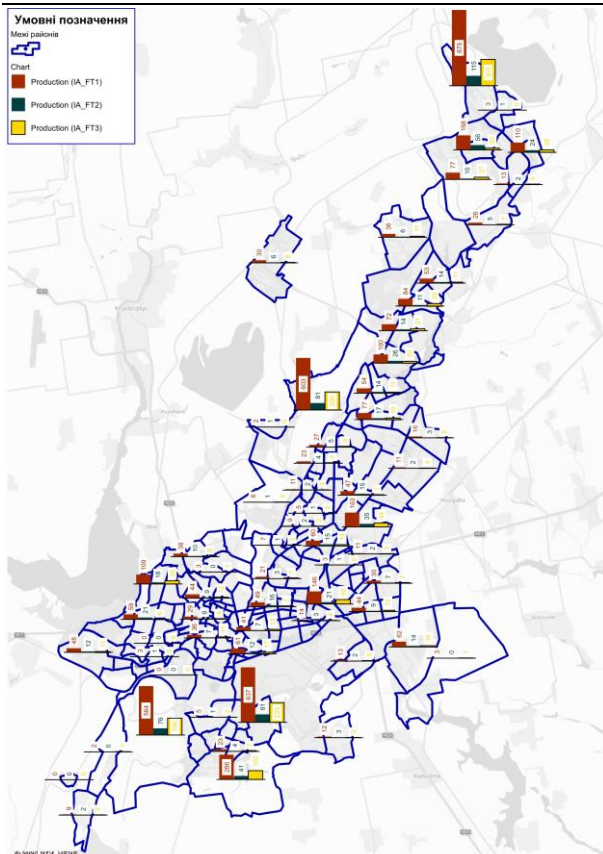


Рисунок 1 – Утворення поїздок транспортними районами міста Кривий Ріг

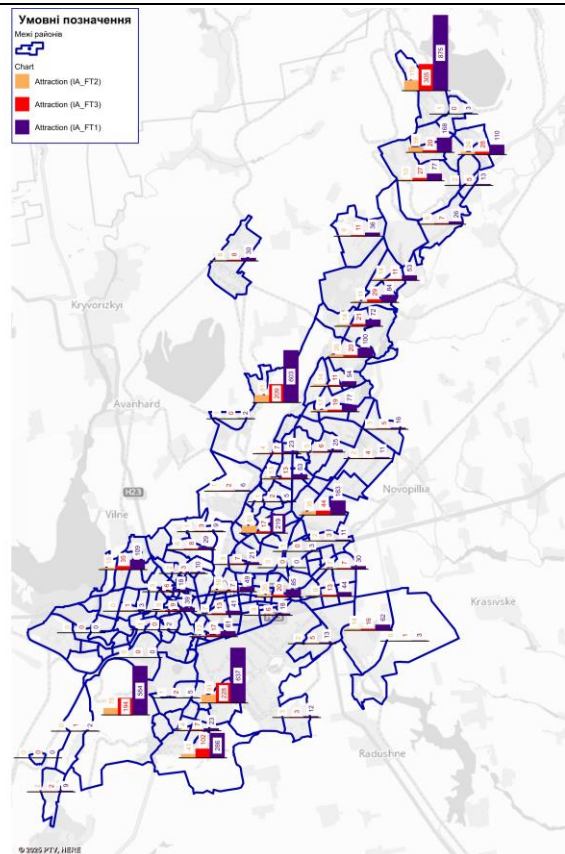


Рисунок 2 – Притягнення поїздок транспортними районами міста Кривий Ріг

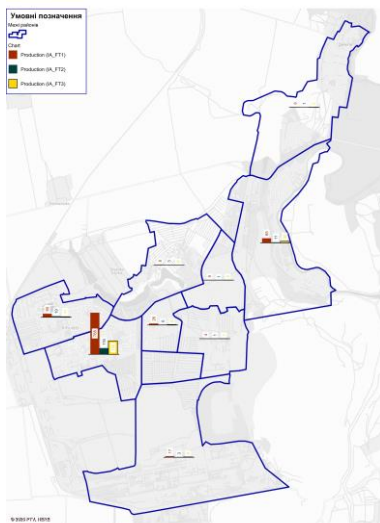


Рисунок 3 – Утворення поїздок транспортними районами Інгульця

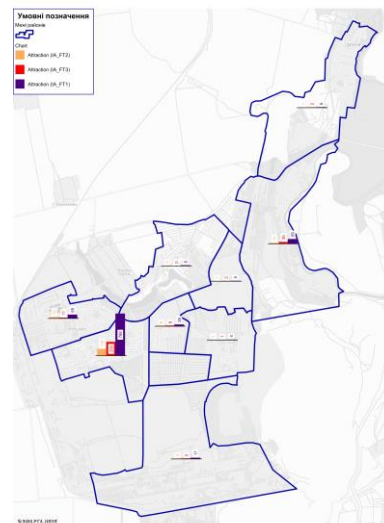


Рисунок 4 – Притягнення поїздок транспортними районами Інгульця

Найбільша кількість поїздок вантажним автотранспортом генерується у гірничопромисловому районі ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг – по трьом транспортним районам вона становить 1487 поїздок за добу для легких автомобілів вантажопідйомністю до 2 т, 208 поїздок за добу – для середніх трьохосних автомобілів вантажопідйомністю від 2 до 8 т, 558 поїздок за добу – для трьохосних самоскидів вантажопідйомністю більше 8 т.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати проведеного моделювання генерації попиту на вантажному автомобільному транспорті для міста Кривий Ріг показали, що по кожному транспортному району моделі та системі вантажного транспорту виконується рівність поїздок за добу, які даний район генерує та одночасно

притягує. Останнє дозволяє стверджувати, що:

- прийнятий розподіл КВЕДів за системами вантажного транспорту $FT1$, $FT2$ та $FT3$ для визначення кількості робочих місць у транспортному районі у якості структурних показників є обґрунтованим;

- ітераційний підхід до балансування утворення та притягнення кількості поїздок через систему рівнянь 3 є обґрунтованим;

- підібрані числові значення коефіцієнтів утворення a_{pi} , b_{pi} , c_{pi} та притягнення d_{sj} , e_{sj} , f_{sj} (система рівнянь 4) дозволяють моделювати генерацію потоків вантажного транспорту із дотриманням балансу між утворенням та притягненням.

Найбільша кількість поїздок за добу легкими, середніми трьохосними вантажними автомобілями та самоскидами утворюється та притягуються транспортними районами, які відносяться до гірничопромислових [15] із концентрацією гірничозбагачувальних комбінатів з видобутку залізної руди відкритим способом та металургійного заводу із сировинною базою, яка знаходиться в адміністративних межах Кривого Рогу. Дану закономірність можна пояснити тим, що основними видами економічної активності у місті є добувна промисловість, розроблення кар'єрів (КВЕД В) та переробна промисловість (КВЕД С). Саме дані КВЕД використовувались на попередніх етапах дослідження транспортних систем міста Кривий Ріг [15] у ролі класифікаційної ознаки стосовно віднесення конкретного транспортного району до групи гірничопромислових, у тому числі, у моделі пасажирського транспорту.

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язані актуальні задачі, які представляють науковий та практичний інтерес – розроблення та апробація підходу до процедури розрахунку генерації поїздок автомобільним вантажним транспортом у міській транспортній моделі для систем легких, середніх автомобілів та самоскидів.

Кількість робочих місць у транспортних районах моделі розподілена за відповідними групами КВЕД, кожна з яких відповідає окремій системі вантажного транспорту, прийнята в якості структурного показника для визначення утворення та притягнення поїздок. Балансування генерації транспортного попиту виконується за допомогою ітераційного алгоритму.

Для перевірки представленого підходу виконано моделювання генерації транспортного попиту на вантажні автомобільні перевезення у місті Кривий Ріг за допомогою транспортної моделі.

Результати моделювання показали, що кількість поїздок, які генеруються та притягуються різними транспортними районами міста, збігається, що підтверджує правильність обраного підходу до розрахунку генерації транспортного попиту для прийнятих систем вантажного транспорту. Також встановлено, що центрами формування та поглинання поїздок на міському вантажному транспорті у Кривому Розі є шість транспортних районів, в яких розташовані підприємства гірничодобувної та металургійної галузей. Для даних районів характерно, що кількість поїздок, які здійснюється трьохосними самоскидами вантажопідйомністю більше 8 т перевищує кількість поїздок середніми трьохосними вантажними автомобілями вантажопідйомністю від 2 до 8 т.

Проведене дослідження обмежується тільки першою процедурою розрахунку попиту у 4-етапній транспортній моделі для вантажного автомобільного транспорту міста Кривий Ріг. Наступні дослідження будуть зосереджені на інших процедурах розрахунку транспортного попиту в рамках даної моделі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Rodrigue, J.-P. (2024). *The Geography of Transport Systems* (6th ed.). Milton Park: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343196-2>
2. Ghaemi, S. A., & Hosseinlou, H.M. (2023). Modeling the urban freight-transportation system using the system dynamics approach. *Systems*, 11(8), 409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
3. Schnieder, M., Hinde, C., & West, A. (2022). Emission estimation of on-demand meal delivery services using a macroscopic simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11667. <https://doi:10.3390/ijerph191811667>
4. Holguín-Veras, J., Jaller, M., Sánchez-Díaz, I., Campbell, S., & Lawson, C.T. (2014). Freight generation and freight trip generation models. In L. Tavasszy, G. de Jong (Ed.), *Modelling freight transport* (pp. 43-63). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
5. Kotenko, V. (2022). Application of algorithmic models of machine learning to the freight transportation process. *Transport Technologies*, 2022(2), 10–21. <https://doi:10.23939/tt2022.02.010>

6. Oliveira, L. K. d., Araújo, G. G. F. d., Bertoncini, B. V., Pedrosa, C. D., & Silva, F. G. F. d. (2022). Modelling freight trip generation based on deliveries for Brazilian municipalities. *Sustainability*, 14(16), 10300. <https://doi.org/10.3390/su141610300>
7. Novak, D. C., Hodgdon, C., Guo, F., & Aultman-Hall, L. (2011). Nationwide freight generation models: A spatial regression approach. *Networks and Spatial Economics*, 11(1), 23–41. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9079-2>
8. Mommens, K.; Lebeau, P.; Verlinde, S.; van Lier, T.; & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BASed model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.003>
9. Zamani, E. D., Smyth, C., Gupta, S., & Dennehy, D. (2022). Artificial Intelligence and big data analytics for supply chain resilience: A systematic literature review. *Annals of Operations Research*, 327(2), 605–632. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04983-y>
10. De Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: An overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1), 103–124. <https://doi.org/10.1080/0144164032000080494>
11. Friedrich, M., Haupt, T., & Nökel, K. (2003) Freight modelling: data issues, survey methods, demand and network models. 10th International Conference on Travel Behaviour Research (pp. 1-35). Lucerne, Switzerland.
12. Betanzo-Quezada, E., & Romero, J. A. (2010). An urban freight transport index. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6312–6322. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.040>.
13. Venkadavarahan, M., & Marisamynathan, S. (2023). Development of freight trip generation model using observed and unobserved information of supply chain characteristics for a sustainable urban transformation. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138500>.
14. *PTV VISUM user manual*. (2024). Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
15. Сістук В. (2024). Дослідження транспортної доступності гірничопромислових районів міста з лінійно-розосередженою планувальною структурою. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(23), 218-228. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.154>
16. Класифікація видів економічної діяльності (КВЕД-2010) складається з таких секцій. URL: https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html (дата звернення 19.03.2025)

REFERENCES

1. Rodrigue, J.-P. (2024). *The Geography of Transport Systems* (6th ed.). Milton Park: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343196-2>
2. Ghaemi, S. A., & Hosseinlou, H.M. (2023). Modeling the urban freight-transportation system using the system dynamics approach. *Systems*, 11(8), 409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
3. Schnieder, M., Hinde, C., & West, A. (2022). Emission estimation of on-demand meal delivery services using a macroscopic simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11667. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811667>
4. Holguín-Veras, J., Jaller, M., Sánchez-Díaz, I., Campbell, S., & Lawson, C.T. (2014). Freight generation and freight trip generation models. In L. Tavasszy, G. de Jong (Ed.), *Modelling freight transport* (pp. 43-63). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
5. Kotenko, V. (2022). Application of algorithmic models of machine learning to the freight transportation process. *Transport Technologies*, 2022(2), 10 – 21. <https://doi.org/10.23939/tt2022.02.010>
6. Oliveira, L. K. d., Araújo, G. G. F. d., Bertoncini, B. V., Pedrosa, C. D., & Silva, F. G. F. d. (2022). Modelling freight trip generation based on deliveries for Brazilian municipalities. *Sustainability*, 14(16), 10300. <https://doi.org/10.3390/su141610300>
7. Novak, D. C., Hodgdon, C., Guo, F., & Aultman-Hall, L. (2011). Nationwide freight generation models: A spatial regression approach. *Networks and Spatial Economics*, 11(1), 23-41. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9079-2>
8. Mommens, K.; Lebeau, P.; Verlinde, S.; van Lier, T.; & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BASed model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102 -111. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.003>
9. Zamani, E. D., Smyth, C., Gupta, S., & Dennehy, D. (2022). Artificial Intelligence and big data analytics for supply chain resilience: A systematic literature review. *Annals of Operations Research*, 327(2), 605-632. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04983-y>

10. De Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: An overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1), 103-124. <https://doi:10.1080/0144164032000080494>
11. Friedrich, M., Haupt, T., & Nökel, K. (2003) Freight modelling: data issues, survey methods, demand and network models. 10th International Conference on Travel Behaviour Research (pp.1-35). Lucerne, Switzerland.
12. Betanzo-Quezada, E., & Romero, J. A. (2010). An urban freight transport index. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6312-6322. <https://doi:10.1016/j.sbspro.2010.04.040>.
13. Venkadavarahan, M., & Marisamynathan, S. (2023). Development of freight trip generation model using observed and unobserved information of supply chain characteristics for a sustainable urban transformation. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138500. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2023.138500>.
14. *PTV VISUM user manual*. (2024). Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
15. Sistuk V. (2024). Studying the transport accessibility of mining areas in a city with a linear dispersed urban planning structure. *Advances in Mechanical Engineering and Transport* 2(23), 218-228. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.154>
16. *Klasyfikatsiia vydiv ekonomichnoi diialnosti (KVED-2010) skladaietsia z takykh sektsii*. Retrieved March 19, 2025 from https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html

V.Sistuk. Modelling trip generation for road freight transportation in Kryvyi Rih.

The paper proposes a method for modelling demand generation (number of trips) in road freight transport within a four-stage demand model. This methodology is structured as follows: 1) urban freight transport is categorized into three distinct systems: light trucks (2.0 to 2.6 m in length, with two or more axles and a maximum carrying capacity of 2 t), medium three-axle trucks (over 2.6 m in length, with a carrying capacity ranging from 2 to 8 t), and three-axle dump trucks (with a carrying capacity exceeding 8 t). 2) In the procedures for trip generation and attraction, the number of jobs within transport districts is employed as a key structural indicator, which is then distributed according to the specific set of economic activities relevant to each freight transport system. To validate the proposed approach, a modelling of demand generation for freight transport in the transport model of Kryvyi Rih was conducted using the PTV Visum software. The results of the modeling demonstrated that the number of trips generated and attracted by different zones of the city matched, confirming the accuracy of the chosen method for calculating the trip generation for specific freight transport systems. It has been established that the production and attraction of trips by urban freight transport in Kryvyi Rih in the six zones where enterprises of the mining and metallurgical complex are situated is notably higher than in other zones within the model. These zones, referred to as mining areas in previous studies on urban mobility in Kryvyi Rih (specifically concerning passenger transport), exhibit distinct patterns in freight transport demand. Future research will focus on further procedures for calculating transport demand within the four-stage transport model.

Keywords: transport demand, road freight transport, transport system, transport modelling, PTV Visum, demand generation, trip production, trip attraction, zone, mining area.

СІСТУК Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, -mail: sistuk@knu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

Volodymyr SISTUK, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Kryvyi Rih National University, e-mail: sistuk@knu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

Дата надходження статті до видання: 14.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1938

**ВПЛИВ ВИДУ ПАЛИВА НА ПАЛИВНУ ЕКОНОМІЧНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ
АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА**

Автомобільний транспорт є одним з найбільших споживачів палив нафтового походження та забруднювачів навколишнього середовища. Тому актуальними є дослідження спрямовані на розширення паливної бази для автомобільного транспорту і раціональне використання альтернативних палив. На даний час в Україні найбільш поширеними альтернативними паливами є спиртовмісний бензин з об'ємним вмістом біоетанолу до 50 % та зріджений нафтовий газ. Перевагою даних палив є те, що їх можна використовувати в двигунах автомобілів без внесення значних конструкційних змін. В даній статті наведено результати досліджень паливо-економічних та екологічних показників автомобільного двигуна за роботи на традиційному бензині А-95 та таких альтернативних паливах, як спиртовмісний бензин Е40 та зріджений нафтовий газ. В результаті досліджень встановлено, що за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 підвищується годинна масова та питома ефективна витрата палива в середньому на 12 %. Об'ємна витрата палива за роботи двигуна на спиртовмісному бензині вища в середньому на 8,5 %. Знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n в середньому на 10,4 %, концентрації NO_x зменшуються в середньому на 3,5 %. За роботи двигуна на ЗНГ знижуються годинна масова та питома ефективна витрата палива. Зниження витрати палива становить в середньому 16,35 %. Об'ємна витрата палива за роботи двигуна на ЗНГ вища в середньому на 12 %. Зростають концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n у ВГ двигуна порівняно з роботою на бензині А-95 в середньому на 36 %. Знижуються концентрації оксидів азоту NO_x у ВГ двигуна. Зниження NO_x становить в середньому 11,6 %.

Ключові слова: паливна економічність, екологічні показники, паливо, спиртовмісний бензин, зріджений нафтовий газ.

ВСТУП

Одним із важливих завдань перед дослідниками в галузі автомобільного транспорту є розширення паливної бази. Воно обумовлене обмеженими світовими запасами нафти та екологічними проблемами спричиненими викидами забруднюючих речовин, що утворюються при згоранні палив нафтового походження в циліндрах двигунів внутрішнього згорання автомобілів. На даний час основними паливами на автомобільному транспорті є бензин і дизельне паливо, яке отримують під час переробки нафти.

У світі активно проводять дослідження по використанню так званих низьковуглецевих та безвуглецевих палив. До низьковуглецевих палив належать різні види біопалива, а також синтетичні палива отримані методом Фішера-Тропша. Даний метод полягає в синтезі рідких палив із газів [1-2]. В даний час ведуться дослідження по створенню та використанню так званого "електронного палива" (e-fuel), сировиною для якого є вуглекислий газ з атмосферного повітря і водень, отриманий з використанням електроенергії з відновлюваних джерел (енергія сонця, вітру і т.д.) [3]. Але поки використання такого палива не набуло поширення, через його високу собівартість. До безвуглецевих палив належать водень (H_2) і аміак (NH_3). Використання водню в двигунах внутрішнього згорання обмежене складністю його зберігання на борту автомобіля і відсутністю на даний час ефективних конструкцій двигунів адаптованих до згорання водню. До недоліків аміаку належать його токсичність і менша, порівняно з традиційними паливами, теплота згорання.

У даний час до найбільш перспективних заміників традиційних палив належать ті, які можна отримати із поновлюваної сировини або побічних продуктів переробки в різних галузях промисловості. До палив з поновлюваної сировини належать спирти, отримані внаслідок бродіння біомаси, біогаз, ефіри рослинних олій. До альтернативних палив також належить зріджений нафтовий газ (ЗНГ) добутий з газоконденсатних родовищ [4].

В Україні в якості альтернативних палив для двигунів легкових автомобілів найбільшого поширення набуло використання зрідженого нафтового газу та спиртовмісного бензину з вмістом біоетанолу до 50 %. Ці палива в даний час можна придбати на автозаправних станціях України. Разом з тим, актуальними є дослідження по їх раціональному використанню в двигунах автомобілів, що перебувають в експлуатації.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результати досліджень використання спиртовмісних бензинів та зрідженого нафтового газу в якості палива для автомобільних двигунів представлено в ряді наукових робіт вітчизняних і

іноземних вчених. В роботі [5] наведено результати досліджень енергетичних, екологічних та паливо-економічних показників двигунів VA3-2103 та Volkswagen BBU в широкому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів при використанні бензину з 10 та 20% добавкою біоетанолу. Випробування проведено з різним регулюванням системи живлення. Перший тип регулювання – збіднений, другий тип регулювання – оптимальний. За результатами проведених експериментальних досліджень у роботі [6] встановлено, що за наявності в експлуатації автомобілів з різними регулюваннями доцільно обмежити розмір добавки біоетанолу до бензину в кількості 10% за об'ємом. Також встановлено, що додавання біоетанолу до бензину в кількості 20% за об'ємом не призведе до погіршення екологічних показників карбюраторного та двигуна із системою впорскування палива без внесення змін до конструкції.

Для подолання негативного впливу підвищеної теплоти випаровування сумішей бензину з добавкою біоетанолу на роботу ДВЗ прийнято застосовувати додатковий підігрів двигуна. В роботі [7] на авіаційному 12-ти циліндровому бензиновому двигуні вхідне повітря підігрівали за рахунок теплоти відпрацьованих газів. Впускний повітропровід виконано у вигляді труби більшого діаметру, розташованої навколо випускного колектору. Температуру підігріву повітря регулювали за допомогою дросельних заслінок. Під час випробування встановлено, що мінімальна температура підігріву вхідного повітря при використанні бензину з добавкою спирту 20% та 40 % за об'ємом становить 15 та 30°C відповідно. Конструкція підігрівача давала змогу регулювати температуру вхідного повітря в широкому діапазоні (до 90 °C).

При використанні спиртовмісного бензину зменшуються концентрації CO та C_mH_n . Також спостерігається незначне зменшення оксидів азоту в порівнянні з роботою двигуна на бензині [7].

Дослідження показників транспортних засобів, що працюють на зрідженому нафтовому газі, показали, що за роботи на ЗНГ знижуються викиди CO_2 та CO, порівняно з роботою на бензині [8-12]. Разом з тим, різниця у викидах NO_x та C_mH_n не така чітка, причому в деяких дослідженнях менші значення викидів отримані за роботи на бензині. Частина дослідників наголошують на необхідності врахування конструкції двигуна автомобіля та його технічного стану при оцінці екологічних показників при використанні ЗНГ. Наприклад, встановлено, що використання ЗНГ приводить до зменшення викидів твердих частинок в двигунах нового покоління з безпосереднім впорскуванням палива [13-15]. У старіших двигунах зниження викидів твердих частинок не виявлено [16-17]. У ряді робіт [18-20] зазначено про зниження викидів CO при русі автомобіля в міських умовах та роботі двигуна на ЗНГ в режимах холостого ходу. Деякі автори повідомляють про незначне збільшення викидів NO_x при використанні ЗНГ, через вищі температури згорання та більш раннє займання [11], тоді як інші дослідження вказують на значне зниження - до 41% у чотиритактних двигунах та 64% у двотактних двигунах [18, 21]. Ці відмінності головним чином зумовлені особливостями протікання процесу згорання, різними коефіцієнтами надлишку повітря, налаштуванням системи запалювання та конструктивними параметрами двигуна [22].

Щодо викидів незгорілих вуглеводнів, сучасні транспортні засоби, що працюють на ЗНГ з ефективними системами нейтралізації відпрацьованих газів, зазвичай мають нижчі значення, ніж автомобілі з бензиновим двигуном [10, 21, 23]. Разом з тим, при використанні ЗНГ у старіших двигунах або при неоптимальному регулюванні системи живлення ці викиди можуть бути порівнянними або навіть вищими [16, 24]. Важливим є також якісний склад вуглеводнів. Зокрема, при згоранні ЗНГ утворюється більше легких алканів, тоді як при спалюванні бензину - більше ароматичних сполук та олефінів з вищим потенціалом утворення озону, що робить ЗНГ більш корисним з точки зору вторинного фотохімічного смогу [25].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення впливу виду палива на паливну економічність та екологічні показники автомобільного двигуна було проведено стендові експериментальні дослідження сучасного двигуна з системою впорскування та зворотнім зв'язком за роботи на товарному бензині А-95, спиртовмісному бензині та зрідженому нафтовому газі. Дослідження проведені в лабораторії випробування двигунів кафедри «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету. Об'єктом експериментальних досліджень є двигун з іскровим запалюванням 4C 7,65/7,56 (VW BBU), який дообладнано системами живлення зрідженим нафтовим газом і приєднаний до гальмівної машини (Рис. 1).

Двигун дообладнано системою впорскування зрідженого нафтового газу четвертого покоління STAG-4, до складу якої входять: редуктор Tomasetto Nordic, форсунки AC W-02, мультиклапан

Tomasetto з ВЗП R67-00 класу А та балон Novogas 42 л. Система живлення даного двигуна забезпечує його роботу як на бензині, так і на ЗНГ.

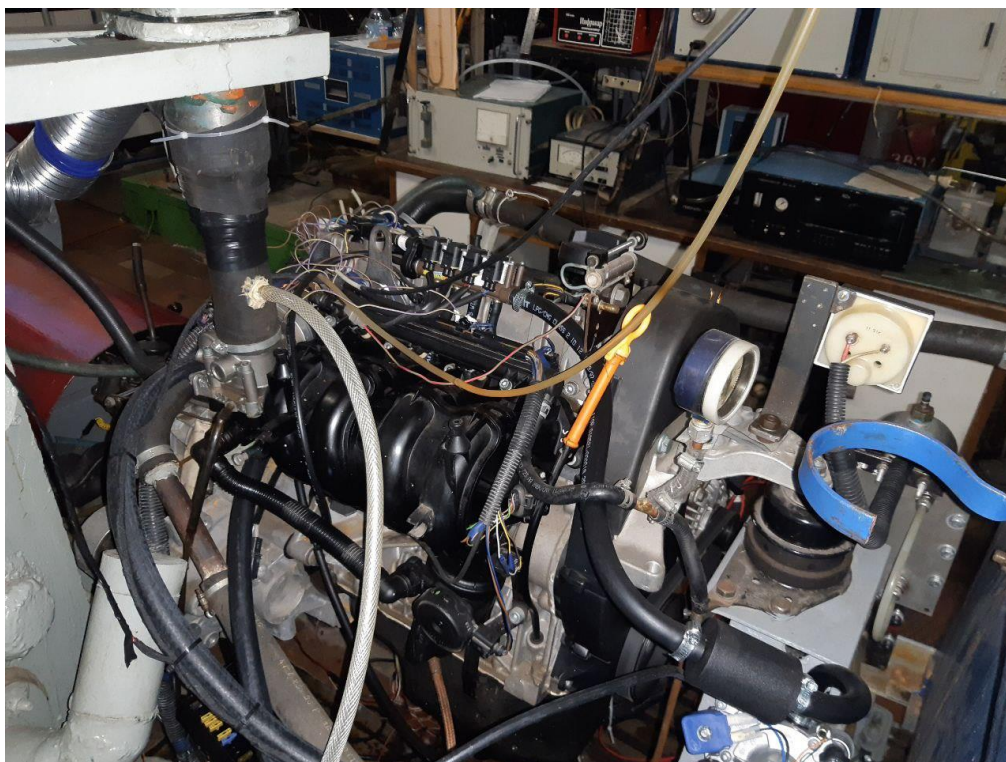


Рисунок 1 – Об'єкт експериментальних досліджень - двигун 4C 7,65/7,56 (VW BBY) із сучасною системою впорскування палива

Вимірювання витрат товарного і спиртовмісного бензинів А95 і Е40 проводили ваговим методом за допомогою електронних терезів МЕРА ВМ 2/3 (Рис. 2).



Рисунок 2 – Електронні терези МЕРА ВМ 2/3

Витрату зрідженого нафтового газу під час стендових випробувань вимірювали масовим витратоміром палива коріолісового типу FlexCOR (рис. 3), який було підключено в розрив паливної магістралі високого тиску між газовим балоном та редуктором з якого відбувалося живлення двигуна під час випробувань.



Рисунок 3 – Масовий витратомір палива коріюлісового типу FlexCOR

Об'ємний вміст шкідливих речовин у ВГ (CO , CO_2 , C_mH_n , NO_x) і коефіцієнту надміру повітря визначали газоаналізатором Bosch BEA 060.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У даному дослідженні використано спиртовмісний бензин Е40 з вмістом біоетанолу близько 40 %. Перед проведенням стендових досліджень було проведено аналіз даного палива в незалежному випробувальному центрі паливо-мастильних матеріалів ТОВ «ВЦ ПММ» (паспорт якості № 5856). Результати аналізу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати аналізу спиртовмісного бензину Е40

№ п/п	Найменування показників	Одиниці виміру	Результати аналізу	Методи випробування
1	Густина за температури 20 °С	кг/м ³	749.7	ГОСТ 3900-85
2	Об'ємна частка ароматичних вуглеводнів	%	11.7	ASTM D 6733-01
3	Об'ємна частка бензолу	%	0.97	ASTM D 6733-01
4	Об'ємна частка кисневмісних сполук:	%		ASTM D 6733-01
	- метанол		<0.1	
	- етанол		34.3	
	- ізопропіловий спирт		0	
	- ізобутиловий спирт		0	
	- третбутиловий спирт		<0.1	
	- МТБЕ		2.3	
	- <i>n</i> -бутанол		1.9	

Як видно з таблиці 1 основною кисневмісною сполукою в даному паливі є етанол, об'ємна частка якого складає 34,3 %. З врахуванням інших кисневмісних компонентів загальна об'ємна частка спиртових сполук становить 38,5 %.

Використовуючи компонентний склад спиртовмісного бензину і нижчі теплоти згорання окремих компонентів розраховано його нижчу теплоту згорання за залежністю:

$$H_{u\text{ сум}} = \sum_{i=1}^m H_{ui} g_i \quad (1)$$

де H_{ui} – нижча теплота згорання окремих складових суміші.

В результаті розрахунку встановлено, що для обраного для досліджень спиртовмісного бензину Е40 нижча теплота згорання становить 37,3595 МДж/кг. Для товарного бензину А-95 прийнято табличне значення нижчої теплоти згорання 44,0 МДж/кг, для ЗНГ – 46,0 МДж/кг [1].

Для визначення впливу виду палива на паливну економічність та екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням визначено порівняльні навантажувальні характеристики за роботи двигуна на товарному бензині А-95, спиртовмісному бензині Е40 та ЗНГ. Навантажувальні характеристики визначено за частоти обертання колінчастого вала 2200 хв⁻¹, яка відповідає частоті обертання при русі автомобіля VW Lupo з даним двигуном в режимі середньої точки Європейського міського їздового циклу.

На рис. 4 показані навантажувальні характеристики двигуна за роботи на бензині А-95 і спиртовмісному бензині Е40.

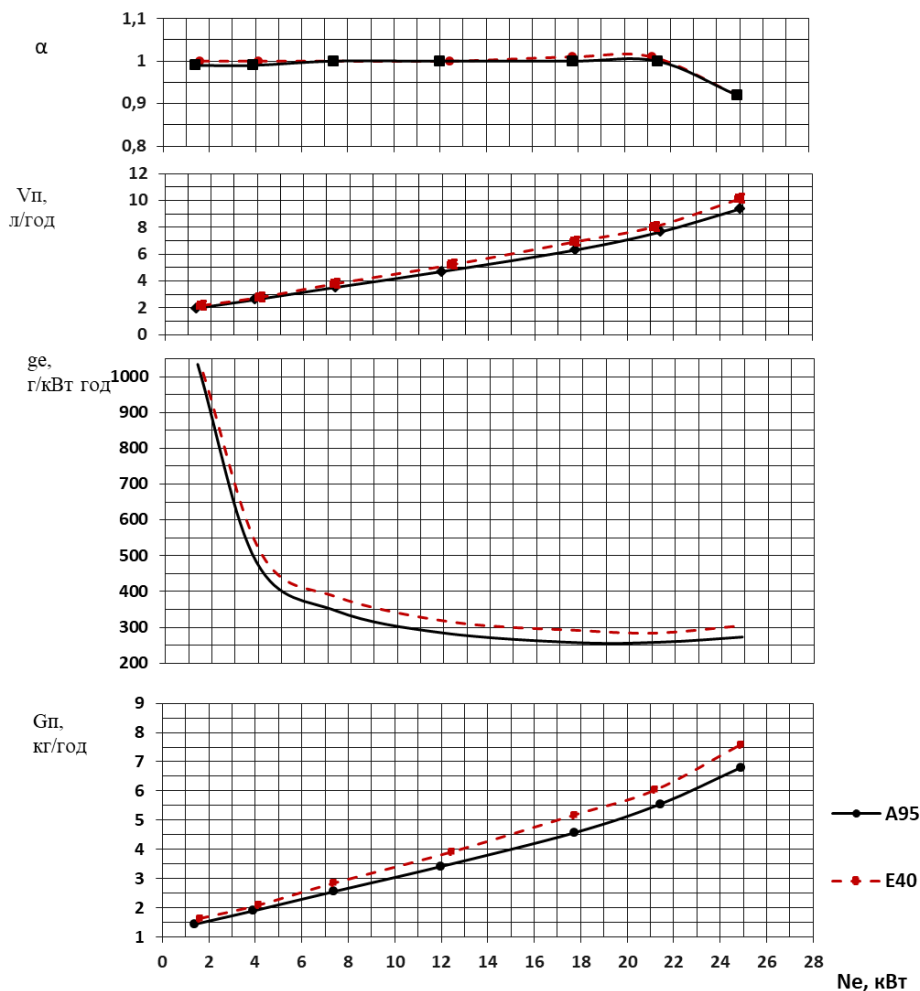


Рисунок 4 - Навантажувальна характеристика бензинового двигуна 4Ч 7,65/7,56 (VW BBU) за роботи на бензині А95 та спиртовмісному бензині Е40 ($n=2200$ хв⁻¹)

Як видно з рис. 4, за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 підвищується годинна масова та питома ефективна витрата палива в усьому діапазоні навантажень для даного швидкісного режиму. Зокрема, витрата палива підвищується в середньому на 12 %. Підвищення витрати спиртовмісного бензину Е40 можна пояснити меншою його нижчою теплотою згорання порівняно з товарним бензином А-95. Разом з тим, якщо врахувати, що автозаправні станції реалізують паливо в об'ємних одиницях, то доцільно оцінити зміну об'ємної витрати палива. Як видно з рис. 2, об'ємна витрата палива за роботи двигуна на спиртовмісному бензині вища в середньому на 8,5 %. Дещо менше підвищення об'ємної витрати спиртовмісного бензину можна пояснити більшою його густиною (0,75 кг/л для Е40 і 0,726 кг/л для А-95). Оскільки даний двигун обладнаний системою керування зі зворотнім зв'язком, то коефіцієнт надміру повітря α підтримується близьким до 1 за

роботи на обох паливах. Крім того, за роботи на бензині А-95 та спиртовмісному бензині Е40 досягається однакова максимальна потужність двигуна.

На рис. 5 показано зміну паливо-економічних показників двигуна в залежності від навантаження за роботи на бензині А-95 і ЗНГ.

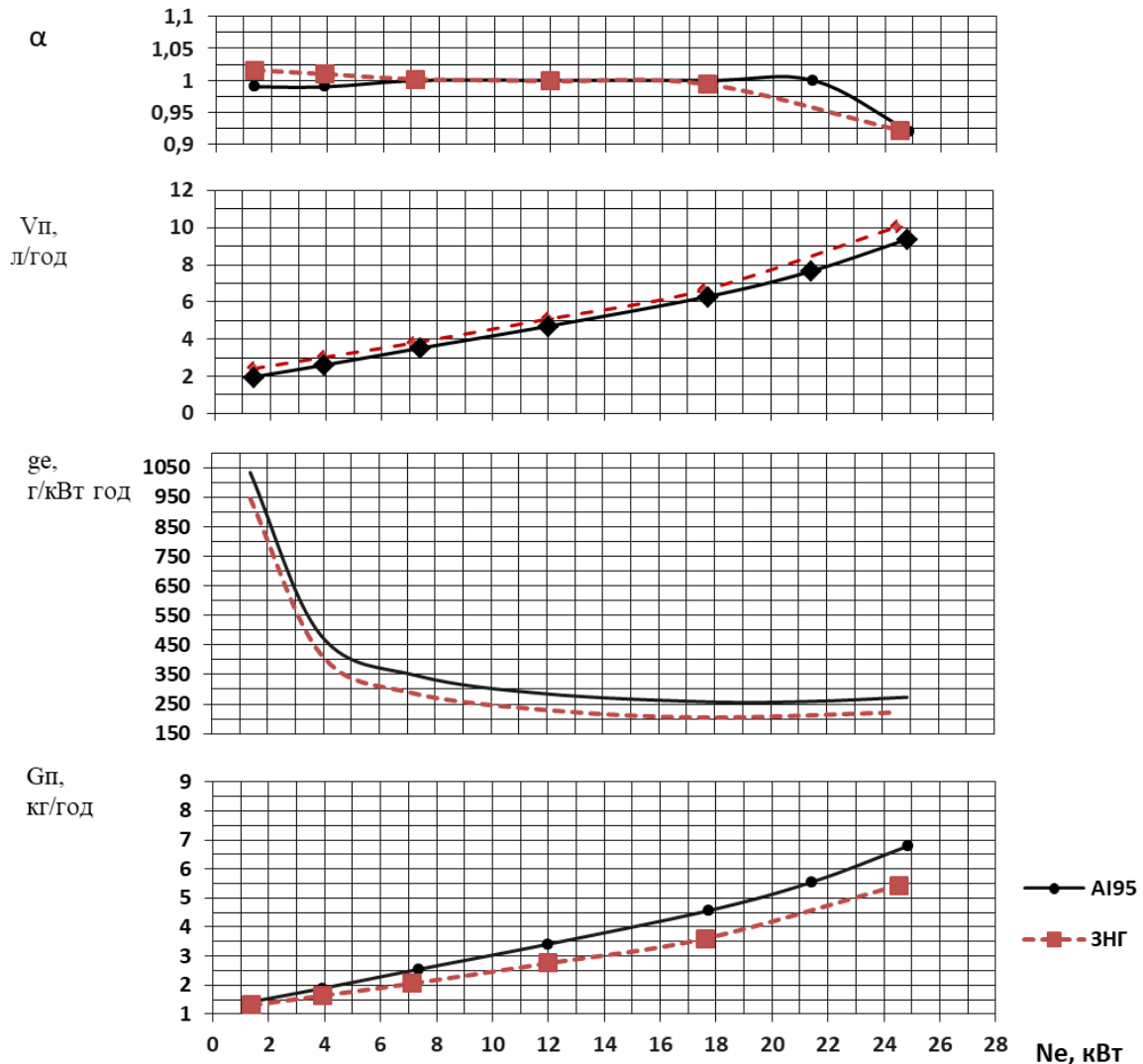


Рисунок 5 - Навантажувальна характеристика двигуна VW BBU за роботи на бензині А95 та зрідженому нафтовому газі ($n=2200$ хв⁻¹)

Як видно з рис. 5, за роботи двигуна на ЗНГ знижуються годинна масова та питома ефективна витрата палива. Зниження витрати палива становить в середньому 16,35 %. Це можна пояснити більш високим значенням нижчої теплоти згорання зрідженого нафтового газу порівняно з бензином. Разом з тим, як видно з рисунку, об'ємна витрата палива за роботи двигуна на ЗНГ вища в середньому на 12 %, що відповідає результатам раніше проведених досліджень з використання зрідженого нафтового газу на транспорті [26]. Коефіцієнт надміру повітря α підтримується близьким до 1 за роботи на обох паливах. Разом з тим, як видно з рис 5, за роботи на ЗНГ дещо знижується максимальна потужність двигуна. Зниження максимальної потужності становить 1,4 % (з 24,88 до 24,53 кВт), що не призведе до значного погіршення тягово-швидкісних властивостей автомобіля при використанні ЗНГ в якості палива.

На рис. 6 показано екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням за роботи на бензині А-95 та спиртовмісному бензині Е40.

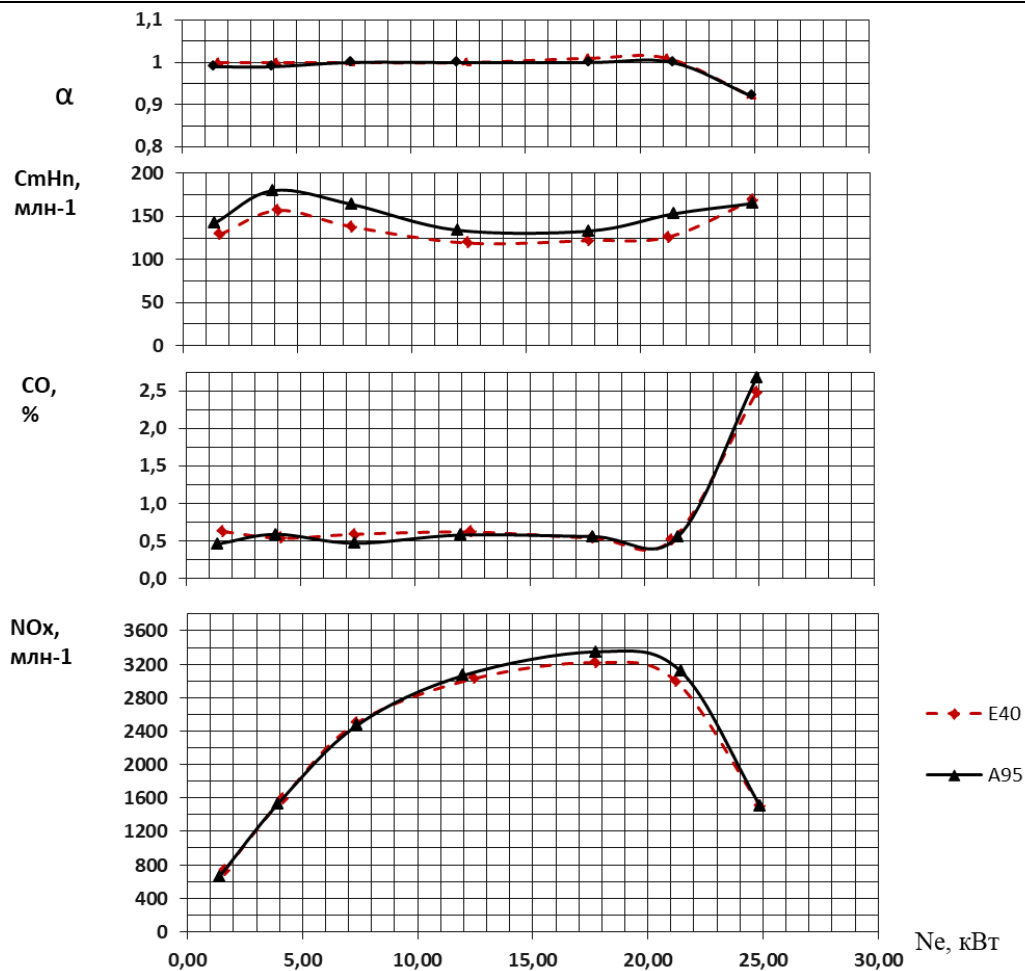


Рисунок 6 – Екологічні показники бензинового двигуна 4Ч 7,65/7,56 (VW BBY) за роботи на бензині А95 та спиртовмісному бензині Е40 ($n=2200 \text{ хв}^{-1}$)

Як видно з рисунку, за роботи двигуна на спиртовмісному бензині у відпрацьованих газах двигуна знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n . Концентрації C_mH_n знижуються в середньому на 10,4 %. Концентрації CO за роботи на обох паливах практично не відрізняються. Концентрації оксидів азоту NO_x за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 з навантаженням до 10 кВт практично не змінюються порівняно з роботою на бензині А-95. Разом з тим, за роботи двигуна з вищим навантаженням при використанні спиртовмісного бензину концентрації NO_x зменшуються в середньому на 3,5 %.

На рис. 7 показано зміну концентрацій забруднюючих речовин у відпрацьованих газах двигуна в залежності від навантаження за роботи на бензині А-95 та ЗНГ.

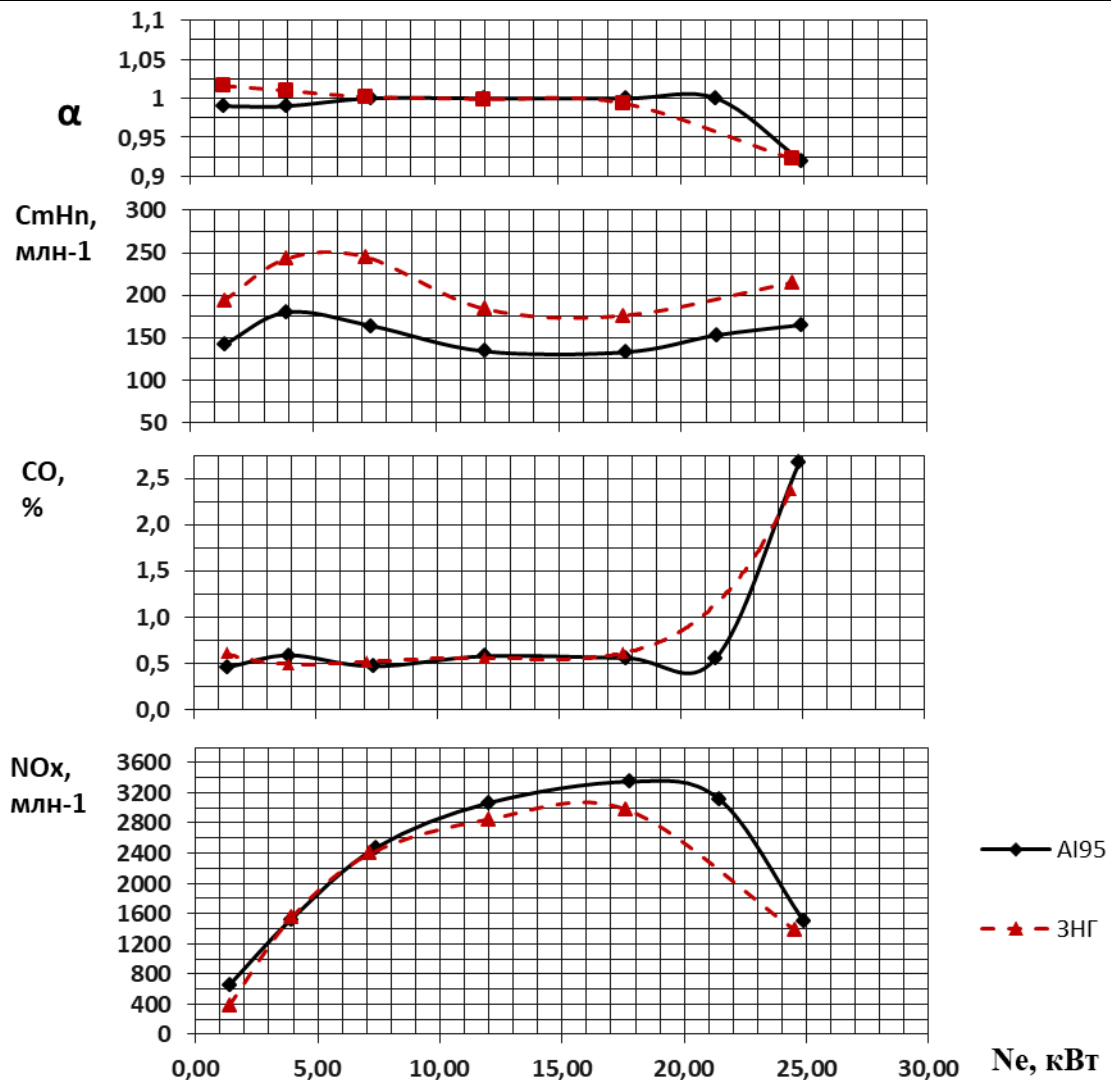


Рисунок 7 - Екологічні показники бензинового двигуна 4Ч 7,65/7,56 (VW BBU) за роботи на бензині А95 та зрідженому нафтовому газі ($n=2200 \text{ хв}^{-1}$)

Як видно з рис. 7, за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі зростають концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n у ВГ двигуна порівняно з роботою на бензині А-95. Концентрації C_mH_n зростають в середньому на 36 %. Концентрації CO за роботи на ЗНГ практично не змінюються порівняно з роботою двигуна на бензині А-95. Разом з тим, за роботи двигуна на ЗНГ знижуються концентрації оксидів азоту NO_x у ВГ двигуна. Зниження NO_x становить в середньому 11,6 %.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В результаті досліджень встановлено, що за роботи на найбільш поширених в Україні альтернативних паливах: спиртовмісному бензині та зрідженому нафтовому газі досягаються такі ж енергетичні показники двигуна, як і за роботи на традиційному бензині. Це дозволяє використовувати їх на автомобільному транспорті, замість традиційного бензину, без погіршення тягово-динамічних показників. Разом з тим, паливо-економічні показники двигуна за роботи на різних паливах відрізняються. Зокрема, найнижча витрата палива в масових одиницях спостерігається за роботи двигуна на ЗНГ, в об'ємних одиницях – за роботи на бензині А-95. Тому для вибору раціонального виду палива за критерієм паливної економічності необхідно провести додаткові дослідження по визначенню експлуатаційної витрати палива автомобілем з двигуном, що працює на різних видах палива з врахуванням вартості кожного палива.

Дослідження екологічних показників показали, що за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів. Це можна пояснити наявністю кисню в спиртовмісному бензині, що приводить до зменшення утворення продуктів неповного згорання. Також за роботи двигуна на бензині Е40 дещо знижуються концентрації оксидів азоту. За роботи двигуна на ЗНГ зростають концентрації незгорілих вуглеводнів і знижуються концентрації оксидів

азоту. Разом з тим, слід зазначити, що в раніше проведених дослідженнях не було встановлено однозначний вплив використання ЗНГ на утворення NO_x , тому є доцільним проведення подальших досліджень екологічних показників двигуна в різних режимах роботи.

Для об'єктивної оцінки впливу виду палива на екологічні показники двигуна і автомобіля доцільно визначити масові викиди забруднюючих речовин в різних швидкісних та навантажувальних режимах, які характерні для експлуатації автомобіля.

ВИСНОВКИ

1. В результаті досліджень встановлено, що за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 підвищується годинна масова та питома ефективна витрата палива в усьому діапазоні навантажень за роботи двигуна з частотою обертання колінчастого вала 2200 хв^{-1} . Зокрема, витрата палива підвищується в середньому на 12 %. Об'ємна витрата палива за роботи двигуна на спиртовмісному бензині вища в середньому на 8,5 %.

2. Встановлено, що за роботи двигуна на спиртовмісному бензині у відпрацьованих газах двигуна знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n . Концентрації C_mH_n знижуються в середньому на 10,4 %. Концентрації CO за роботи на обох паливах практично не відрізняються. Концентрації оксидів азоту NO_x за роботи двигуна на спиртовмісному бензині Е40 з навантаженням до 10 кВт практично не змінюються порівняно з роботою на бензині А-95. Разом з тим, за роботи двигуна з вищим навантаженням при використанні спиртовмісного бензину концентрації NO_x зменшуються в середньому на 3,5 %.

3. Встановлено, що за роботи двигуна на ЗНГ знижуються годинна масова та питома ефективна витрата палива. Зниження витрати палива становить в середньому 16,35 %. Об'ємна витрата палива за роботи двигуна на ЗНГ вища в середньому на 12 %.

4. Встановлено, що за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі зростають концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n у ВГ двигуна порівняно з роботою на бензині А-95. Концентрації C_mH_n зростають в середньому на 36 %. Концентрації CO за роботи на ЗНГ практично не змінюються порівняно з роботою двигуна на бензині А-95. Разом з тим, за роботи двигуна на ЗНГ знижуються концентрації оксидів азоту NO_x у ВГ двигуна. Зниження NO_x становить в середньому 11,6 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Jin, N., Long, W., Xie, C., & Tian, H. (2025). After-Treatment Technologies for Emissions of Low-Carbon Fuel Internal Combustion Engines: Current Status and Prospects. *Energies*, 18(15), 4063. <https://doi.org/10.3390/en18154063>

2. Dell'Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., & Di Giuliano, A. (2024). E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, 17(16), 3995. <https://doi.org/10.3390/en17163995>

3. Leonardo Colelli, Sonia Dell'Aversano, Claudia Bassano, Giuseppina Vanga, Katia Gallucci, Giorgio Vilardi, Liquid e-fuels for a sustainable future: A comprehensive review of production, regulation, and technological innovation, *Energy Conversion and Management*, Volume 347, 2026, 120529, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120529>.

4. Про альтернативні види палива : Закон України від 14 січня 2000 р. № 1391-XIV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1391-14> (дата звернення: 02.11.2025).

5. Кульбако В.П. Покращення екологічних показників автомобіля в експлуатаційних умовах добавкою біоетанолу до бензину : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.20 / Кульбако Валентин Петрович; Національний транспортний університет. К., 2012. – 20 с.

6. Гутаревич Ю.Ф. Використання спиртових сполук як добавок до бензинів для розширення паливної бази автомобільного транспорту [Текст] / Ю.Ф. Гутаревич, В.С. Устименко, В.П. Кульбако, І.В. Самойленко // Вісник Національного транспортного університету : науково-технічний збірник. – М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУ ; гол. ред. М. Ф. Дмитриченко. – Київ, 2011. – Вип. 22. – С. 19-24.

7. Гайдай О. О. Екологічні та експлуатаційні характеристики палива моторного біологічного Е-85. — [Електронний ресурс] / [О. О. Гайдай, С. О. Зубенко, Є. В. Полункін, В. С. Пилявський] // Збірник наукових статей III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. — Вінниця, 2011. — Т. 1. — С. 308–310. — Режим доступу: <http://eco.com.ua/>

8. Lyu, M.; Xu, Y.; Huang, M.; Wang, Y. Real World Emissions in a High-Altitude City: A Comparison between LPG Taxis and Gasoline Cars. In Proceedings of the WCX SAE World Congress Experience, Detroit, MI, USA, 8–10 April 2025.
9. Šarkan, B.; Jaškiewicz, M.; Kubiak, P.; Tarnapowicz, D.; Loman, M. Exhaust Emissions Measurement of a Vehicle with Retrofitted LPG System. *Energies* 2022, 15, 1184.
10. Bellin, T.; Casadei, S.; Rossi, T.; Bernetti, A.; De Lauretis, R.; Lonati, G. Determination of Euro 6 LPG Passenger Car Emission Factors through Laboratory and On-Road Tests: Effect on Nation-Wide Emissions Assessment for Italy. *Atmos. Environ. X* 2022, 15, 100186.
11. Talib Hashem, G.; Al-Dawody, M.F.; Sarris, I.E. The Characteristics of Gasoline Engines with the Use of LPG: An Experimental and Numerical Study. *Int. J. Thermofluids* 2023, 18, 100316. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Ristovski, Z.D.; Jayaratne, E.R.; Morawska, L.; Ayoko, G.A.; Lim, M. Particle and Carbon Dioxide Emissions from Passenger Vehicles Operating on Unleaded Petrol and LPG Fuel. *Sci. Total Environ.* 2005, 345, 93–98.
13. Kontses, A.; Triantafyllopoulos, G.; Ntziachristos, L.; Samaras, Z. Particle Number (PN) Emissions from Gasoline, Diesel, LPG, CNG and Hybrid-Electric Light-Duty Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmos. Environ.* 2020, 222, 117126.
14. Lou, D.; Qi, B.; Zhang, Y.; Fang, L. Research on the Emission Characteristics of a Passenger Car Powered by Ethanol, Methanol, and Liquefied Petroleum Gas Under Real-World Running Conditions. *J. Energy Resour. Technol.* 2023, 145, 042303.
15. Špička, L.; Poul, A.; Huzlík, J.; Bucková, M.; Hegrová, J.; Ličbinský, R. Comparison of High Mileage LPG Cars in Different Technical Condition in Czechia: Particle-Bound PAHs. *Atmos. Environ. X* 2024, 23, 100294.
16. Špička, L.; Poul, A.; Huzlík, J.; Bucková, M.; Hegrová, J.; Ličbinský, R. Comparison of High Mileage LPG Cars in Different Technical Condition in Czechia: Particle-Bound PAHs. *Atmos. Environ. X* 2024, 23, 100294.
17. Chikhi, S.; Boughedaoui, M.; Kerbachi, R.; Joumard, R. On-Board Measurement of Emissions from Liquefied Petroleum Gas, Gasoline and Diesel Powered Passenger Cars in Algeria. *J. Environ. Sci.* 2014, 26, 1651–1659.
18. Simsek, S.; Uslu, S. Investigation of the Impacts of Gasoline, Biogas and LPG Fuels on Engine Performance and Exhaust Emissions in Different Throttle Positions on SI Engine. *Fuel* 2020, 279, 118528.
19. Duy, V.N.; Duc, K.N.; Van, N.C. Real-Time Driving Cycle Measurements of Fuel Consumption and Pollutant Emissions of a Bi-Fuel LPG-Gasoline Motorcycle. *Energy Convers. Manag.* 2021, 12, 100135.
20. Chłopek, Z.; Lasocki, J.; Sar, H. Study of Dynamic and Ecological Properties of Automotive Bi-Fuel Engine. *Int. J. Energy Environ. Eng.* 2022, 13, 1–10.
21. Usman, M.; Ijaz Malik, M.A.; Ranjha, Q.A.; Arif, W.; Jamil, M.K.; Miran, S.; Siddiqui, S. Experimental Assessment of Performance, Emission and Lube Oil Deterioration Using Gasoline and LPG for a Sustainable Environment. *Case Stud. Therm. Eng.* 2023, 49, 103300.
22. Iodice, P.; Amoresano, A.; Langella, G. A Review on the Effects of Ethanol/Gasoline Fuel Blends on NO_x Emissions in Spark-Ignition Engines. *Biofuel Res. J.* 2021, 8, 1465–1480.
23. Kozłowski, E., Rimkus, A., Zimakowska-Laskowska, M., Matijošius, J., Wiśniowski, P., Traczyński, M., Laskowski, P., & Madlenak, R. (2025). Energy and Environmental Impacts of Replacing Gasoline with LPG Under Real Driving Conditions. *Energies*, 18(20), 5522. <https://doi.org/10.3390/en18205522>
24. Organ, B.; Huang, Y.; Zhou, J.L.; Surawski, N.C.; Yam, Y.-S.; Mok, W.-C.; Hong, G. A Remote Sensing Emissions Monitoring Programme Reduces Emissions of Gasoline and LPG Vehicles. *Environ. Res.* 2019, 177, 108614.
25. Zhang, Y.; Yang, W.; Simpson, I.; Huang, X.; Yu, J.; Huang, Z.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Liu, D.; Huang, Z.; et al. Decadal Changes in Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) from on-Road Vehicles with Intensified Automobile Pollution Control: Case Study in a Busy Urban Tunnel in South China. *Environ. Pollut.* 2018, 233, 806–819.
26. Manko, I.; Shuba, Y.; Korpach, A.; Gutarevyc, S.; Ragulskiene, J.; Pauliukas, A. Measurement of Fuel Consumption and Harmful Emissions of Cars When Using Different Types of Fuel. *J. Meas. Eng.* 2020, 8, 182–196.

REFERENCES

1. Jin, N., Long, W., Xie, C., & Tian, H. (2025). After-Treatment Technologies for Emissions of Low-Carbon Fuel Internal Combustion Engines: Current Status and Prospects. *Energies*, 18(15), 4063. <https://doi.org/10.3390/en18154063>
2. Dell'Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., & Di Giuliano, A. (2024). E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, 17(16), 3995. <https://doi.org/10.3390/en17163995>
3. Leonardo Colelli, Sonia Dell'Aversano, Claudia Bassano, Giuseppina Vanga, Katia Gallucci, Giorgio Vilardi, Liquid e-fuels for a sustainable future: A comprehensive review of production, regulation, and technological innovation, *Energy Conversion and Management*, Volume 347, 2026, 120529, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120529>.
4. Pro alternatyvni vydy palyva : Zakon Ukrainy vid 14 sichnia 2000 r. № 1391-XIV // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1391-14> (data zvernennia: 02.11.2025).
5. Kulbako V.P. Pokrashchennia ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilia v ekspluatatsiinykh umovakh dobavkoiu bioetanolu do benzynu : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.20 / Kulbako Valentyn Petrovych; Natsionalnyi transportnyi universytet. K., 2012. – 20 s.
6. Hutarevych Yu.F. Vykorystannia spyrtovykh spoluk yak dobavok do benzyniv dlia rozshyrennia palyvnoi bazy avtomobilnoho transportu [Tekst] / Yu.F. Hutarevych, V.S. Ustymenko, V.P. Kulbako, I.V. Samoilenko // Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu : nauково-tekhnichnyi zbirnyk. – M-vo osvity i nauky, molodi ta sportu Ukrainy, NTU ; hol. red. M. F. Dmytrychenko. – Kyiv, 2011. – Vyp. 22. – S. 19-24.
7. Haidai O. O. Ekolohichni ta ekspluatatsiini kharakterystyky palyva motornoho biolohichnoho E-85. — [Elektronnyi resurs] / [O. O. Haidai, S. O. Zubenko, Ye. V. Polunkin, V. S. Pyliavskiy] // Zbirnyk naukovykh statei III-ho Vseukrainskoho zizdu ekolohiv z mizhnarodnoiu uchastiu. — Vinnytsia, 2011. — T. 1. — S. 308–310. — Rezhym dostupu: <http://eco.com.ua/>
8. Lyu, M.; Xu, Y.; Huang, M.; Wang, Y. Real World Emissions in a High-Altitude City: A Comparison between LPG Taxis and Gasoline Cars. In Proceedings of the WCX SAE World Congress Experience, Detroit, MI, USA, 8–10 April 2025.
9. Šarkan, B.; Jaškiewicz, M.; Kubiak, P.; Tarnapowicz, D.; Loman, M. Exhaust Emissions Measurement of a Vehicle with Retrofitted LPG System. *Energies* 2022, 15, 1184.
10. Bellin, T.; Casadei, S.; Rossi, T.; Bernetti, A.; De Lauretis, R.; Lonati, G. Determination of Euro 6 LPG Passenger Car Emission Factors through Laboratory and On-Road Tests: Effect on Nation-Wide Emissions Assessment for Italy. *Atmos. Environ. X* 2022, 15, 100186.
11. Talib Hashem, G.; Al-Dawody, M.F.; Sarris, I.E. The Characteristics of Gasoline Engines with the Use of LPG: An Experimental and Numerical Study. *Int. J. Thermofluids* 2023, 18, 100316. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Ristovski, Z.D.; Jayaratne, E.R.; Morawska, L.; Ayoko, G.A.; Lim, M. Particle and Carbon Dioxide Emissions from Passenger Vehicles Operating on Unleaded Petrol and LPG Fuel. *Sci. Total Environ.* 2005, 345, 93–98.
13. Kontses, A.; Triantafyllopoulos, G.; Ntziachristos, L.; Samaras, Z. Particle Number (PN) Emissions from Gasoline, Diesel, LPG, CNG and Hybrid-Electric Light-Duty Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmos. Environ.* 2020, 222, 117126.
14. Lou, D.; Qi, B.; Zhang, Y.; Fang, L. Research on the Emission Characteristics of a Passenger Car Powered by Ethanol, Methanol, and Liquefied Petroleum Gas Under Real-World Running Conditions. *J. Energy Resour. Technol.* 2023, 145, 042303.
15. Špička, L.; Poul, A.; Huzlík, J.; Bucková, M.; Hegrová, J.; Ličbinský, R. Comparison of High Mileage LPG Cars in Different Technical Condition in Czechia: Particle-Bound PAHs. *Atmos. Environ. X* 2024, 23, 100294.
16. Špička, L.; Poul, A.; Huzlík, J.; Bucková, M.; Hegrová, J.; Ličbinský, R. Comparison of High Mileage LPG Cars in Different Technical Condition in Czechia: Particle-Bound PAHs. *Atmos. Environ. X* 2024, 23, 100294.
17. Chikhi, S.; Boughedaoui, M.; Kerbachi, R.; Joumard, R. On-Board Measurement of Emissions from Liquefied Petroleum Gas, Gasoline and Diesel Powered Passenger Cars in Algeria. *J. Environ. Sci.* 2014, 26, 1651–1659.

18. Simsek, S.; Uslu, S. Investigation of the Impacts of Gasoline, Biogas and LPG Fuels on Engine Performance and Exhaust Emissions in Different Throttle Positions on SI Engine. *Fuel* 2020, 279, 118528.
19. Duy, V.N.; Duc, K.N.; Van, N.C. Real-Time Driving Cycle Measurements of Fuel Consumption and Pollutant Emissions of a Bi-Fuel LPG-Gasoline Motorcycle. *Energy Convers. Manag.* X 2021, 12, 100135.
20. Chłopek, Z.; Lasocki, J.; Sar, H. Study of Dynamic and Ecological Properties of Automotive Bi-Fuel Engine. *Int. J. Energy Environ. Eng.* 2022, 13, 1–10.
21. Usman, M.; Ijaz Malik, M.A.; Ranjha, Q.A.; Arif, W.; Jamil, M.K.; Miran, S.; Siddiqui, S. Experimental Assessment of Performance, Emission and Lube Oil Deterioration Using Gasoline and LPG for a Sustainable Environment. *Case Stud. Therm. Eng.* 2023, 49, 103300.
22. Iodice, P.; Amoresano, A.; Langella, G. A Review on the Effects of Ethanol/Gasoline Fuel Blends on NO_x Emissions in Spark-Ignition Engines. *Biofuel Res. J.* 2021, 8, 1465–1480.
23. Kozłowski, E., Rimkus, A., Zimakowska-Laskowska, M., Matijošius, J., Wiśniowski, P., Traczyński, M., Laskowski, P., & Madlenak, R. (2025). Energy and Environmental Impacts of Replacing Gasoline with LPG Under Real Driving Conditions. *Energies*, 18(20), 5522. <https://doi.org/10.3390/en18205522>
24. Organ, B.; Huang, Y.; Zhou, J.L.; Surawski, N.C.; Yam, Y.-S.; Mok, W.-C.; Hong, G. A Remote Sensing Emissions Monitoring Programme Reduces Emissions of Gasoline and LPG Vehicles. *Environ. Res.* 2019, 177, 108614.
25. Zhang, Y.; Yang, W.; Simpson, I.; Huang, X.; Yu, J.; Huang, Z.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Liu, D.; Huang, Z.; et al. Decadal Changes in Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) from on-Road Vehicles with Intensified Automobile Pollution Control: Case Study in a Busy Urban Tunnel in South China. *Environ. Pollut.* 2018, 233, 806–819.
26. Manko, I.; Shuba, Y.; Korpach, A.; Gutarevyc, S.; Ragulskiene, J.; Pauliukas, A. Measurement of Fuel Consumption and Harmful Emissions of Cars When Using Different Types of Fuel. *J. Meas. Eng.* 2020, 8, 182–196.

Y. Shuba, O. Dobrovolskyi, O. Marynych. Influence of fuel type on the fuel economy and environmental performance of an automotive engine.

Road transport is among the largest consumers of petroleum-based fuels and one of the main contributors to environmental pollution. Therefore, research focused on expanding the fuel base for vehicles and promoting the efficient use of alternative fuels is of significant importance. Currently, in Ukraine, the most widespread alternative fuels are alcohol–gasoline blends containing up to 50% bioethanol by volume, as well as liquefied petroleum gas (LPG). A key advantage of these fuels is that they can be utilized in internal combustion engines without major structural modifications. This paper presents the results of an experimental investigation into the fuel economy and environmental performance of an automotive engine operating on conventional gasoline A-95 and alternative fuels such as alcohol–gasoline blend E40 and liquefied petroleum gas. The results indicate that when operating on E40, the engine demonstrates an average increase of 12% in hourly mass and specific effective fuel consumption. The volumetric fuel consumption rises by approximately 8.5%. In terms of exhaust emissions, the concentration of unburned hydrocarbons (C_mH_n) decreases by an average of 10.4%, while nitrogen oxides (NO_x) concentrations are reduced by about 3.5%. When operating on LPG, both hourly mass and specific effective fuel consumption decrease, with an average reduction of 16.35%. However, the volumetric fuel consumption increases by approximately 12%. The concentration of unburned hydrocarbons (C_mH_n) in the exhaust gases rises by an average of 36% compared to gasoline A-95 operation, whereas NO_x emissions are reduced by about 11.6%.

Keywords: fuel economy, environmental performance, alternative fuels, alcohol–gasoline blend, liquefied petroleum gas.

ШУБА Євгеній Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: y.shuba@ntu.edu.ua, тел. +380688147423, <https://orcid.org/0000-0003-2036-8024>

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: dobrovolskiy@ukr.net, тел. +380632977210, <https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>

МАРИНИЧ Олександр Олегович, аспірант кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: olecalibra25@gmail.com, тел. +38066-435-86-88, <https://orcid.org/0009-0009-2544-6408>

Yevhenii SHUBA, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engines and Thermal Engineering, National Transport University, y.shuba@ntu.edu.ua, tel. +380688147423, <https://orcid.org/0000-0003-2036-8024>

Oleksandr DOBROVOLSKYI, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Engines and Thermal Engineering, National Transport University, e-mail: dobrovolskiy@ukr.net, tel. +380632977210, <https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>

Oleksandr MARYNYCH, Postgraduate Student of the Department of Engines and Thermal Engineering, National Transport University, e-mail: olecalibra25@gmail.com, tel. +38066-435-86-88, <https://orcid.org/0009-0009-2544-6408>

Дата надходження статті до видання: 04.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1939

R. Polinkevich, N. Zubovetska, R. Redko, T. Chetverzhuk, O. Zaleta, B. Valetskyi
Lutsk National Technical University

RESEARCH OF TEMPERATURE PROCESSES DURING DRILLING OF HOLES

The paper addresses an axisymmetric thermophysical problem occurring during deep-hole drilling, based on a proposed mathematical model for temperature calculation using the heat source method and the principles of spatial-temporal correspondence and local influence. The dependencies of the thermal process were determined, taking into account the mutual positioning of the cutting tool and the part, the material of the workpiece, the presence of cooling with cutting fluid, cutting conditions, chip removal, and the duration of the drilling operation itself. This is particularly important for deep drilling, where the heat source is continuously displaced.

It was established that the calculation of the temperature field in the workpiece depends on the action of a ring-shaped heat source with a uniform heat release intensity distribution. Theoretical analysis showed that the maximum temperature should not exceed 300 °C (without lubricating and cooling fluid) and 180 °C (with lubricating and cooling fluid), respectively. Standard chromel-alumel thermocouples (temperature range –100 °C to +1000 °C) were used for temperature measurement.

Deep-hole drilling experiments were performed on parts made of Steel 45 (analogous to C45E and Ck45 according to the EU standard EN 10083-2) with diameters of 10 mm and 20 mm, using special deep-drilling tools. The machining was carried out on a universal lathe model 16K20, modified for deep drilling. The temperature in the tool-workpiece contact zone and the temperature distribution within the workpiece (temperature gradient) were calculated. The adequacy of the proposed mathematical model was confirmed, as the calculated temperature values corresponded well with the experimental data.

Keywords: heat source, deep drilling, thermal conductivity, heat source method, principle of spatial-temporal correspondence.

INTRODUCTION

Parts with deep holes are manufactured across all areas of mechanical engineering and instrument making. Deep holes are primarily associated with moving parts of machines and mechanisms, determining their performance characteristics, reliability, and operational durability.

A hole is considered deep if the ratio of its length to diameter exceeds 10. However, in practice, when machining a hole to a depth greater than three diameters, difficulties arise with chip removal, reduced drill stability, and decreased machining productivity.

Deep-hole drilling technologies differ from conventional hole machining and require the use of specialized equipment and technological tools – namely special cutting, auxiliary, measuring tools and devices. During deep drilling, a lubricating and cooling fluid (LCF) is supplied to the tool, which defines not only the specific features of the process but also those of the equipment and tools used [1].

When drilling holes, an axisymmetric thermophysical problem arises, associated with calculating the temperature field of the workpiece from the action of a heat source in the form of a ring with a uniform distribution of heat release intensity.

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND STATEMENT OF THE PROBLEM

Representation of the thermal process makes it possible to use the fundamental solution of the heat conduction equation for axisymmetric thermophysical problems, for example, the expression for calculating the temperature field in an infinite body with an instantaneous source of power q , J/m in the form of a circle with radius r' , acting in the plane $z'=0$ at time $t=0$ [2]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{Q}{8c\rho(\pi a t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2 + (r')^2 + (z-z')^2}{4at}\right] I_0\left(\frac{rr'}{2at}\right), \quad (1)$$

where $Q=2\pi r'q$; $I_0\left(\frac{rr'}{2at}\right)$ – Bessel function of zero order from the imaginary argument;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – thermal conductivity coefficient; $C\rho$ – volumetric heat capacity; λ – thermal conductivity coefficient.

According to the method of images, the thermal regime in a body with an opening of radius r_0 , on the adiabatic surface of which an annular heat source with power $Q = 2\pi r_0 q$ is located, will be equivalent to the thermal regime in an infinite body in the region $r \geq r_0$, if, in the latter, a ring source of double power $Q_0=2Q$ is placed at $r = r_0$, and a heat sink with power $Q_c = -Q$ is placed at $r = 0$.

In the adopted schematisation of the thermal regime, heat transfer to the environment, the workpiece and the tool is not taken into account, since these heat exchange conditions can be taken into account through the corresponding coefficient when solving the balance problem. During drilling, about 75% of the heat is transferred to the workpiece.

According to the principle of local influence [3], it is permissible to consider the temperature field in the part as the sum of two components: the general field, located far from the source, and the local field, directly in the source space. In this case, when determining the general field, the heat source may be schematized in various ways, while more accurate heat dissipation conditions should be taken into account. When calculating the local field, the heat dissipation conditions may be simplified, but the intensity distribution of the local source must be represented as accurately as possible.

In this regard, when calculating the local temperature field in a part, the following simplification can be made. The workpiece can be conditionally represented as an unlimited body with a cylindrical hole of radius r_0 . Further, considering that the circumferential speed of the source is several orders of magnitude greater than the feed rate, according to the Peclet criterion $e = \frac{2VR}{a} \geq 10$, such a fast-moving local source can, within one revolution of the part, be regarded as an instantaneous spatial ring [4] with an intensity distribution along the radial direction r and coordinate z following to the normal Gaussian law:

$$q(r', z') = q_0 \exp \left[-k \frac{(r_0 - r')^2 + (z')^2}{R^2} \right]. \quad (2)$$

According to the principle of space-time correspondence [5], to transition from the solution describing the temperature field in an infinite body with an instantaneous ring source (1) to the corresponding solution with a normal toroidal source (2), it is sufficient to introduce a time constant:

$$t_0 = \frac{R^2}{a},$$

where R is the characteristic size of the heat source m ; k is the concentration coefficient of the source intensity.

PURPOSE AND TASKS OF THE RESEARCH

The purpose of this work is to experimentally investigate the temperature factors in the tool-workpiece contact zone. The objective is to develop a mathematical model for heat accumulation in the cutting zone during deep hole drilling and to verify its adequacy.

RESEARCH RESULTS

It is known that for small time intervals, i.e., for large values of the Bessel function argument, in relations (1) the following substitution can be made:

$$J_0 \left[\frac{rr'}{2at} \right] \approx \frac{\exp \left[\frac{rr'}{2at} \right]}{\sqrt{2\pi \frac{rr'}{2at}}}.$$

After the transformations for small time intervals, the solution describing the thermal regime in an infinite body with an opening of radius r_0 with a normal toroidal source, at $r' = r_0$, $z' = 0$, is obtained in the following form:

$$\theta(r, z, t) = \frac{q}{8\lambda\pi^2 \sqrt{rr_0} \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2 + z^2}{4a \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \right]. \quad (3)$$

If the local field takes into account the process of heating the part over a time interval corresponding to one revolution of the source, then the total field must take into account the accumulation of heat over the entire processing time, as well as for the additional heating caused by it.

In accordance with the principle of local influence, it is reasonable to assume that each individual revolution of the source preceding the last one, which determines the local field, represents an instantaneous heat impulse maximally concentrated along the radial and generatrix directions. Based on this, the process of heat accumulation in the body can be represented by the following diagram.

Let us assume that the heat source J_0 (Fig. 1), which determines the local field in the area near the diametral cross-section $z=0$, appears at time $t=0$. Accordingly, the previous revolution of the source, rotating with an angular velocity ω and having a feed rate S per revolution (shown in the diagram as the instantaneous ring source J_1), ended before the moment of time $t_1=2\pi/\omega$, at a distance $z_1=S$ from the source J_0 .

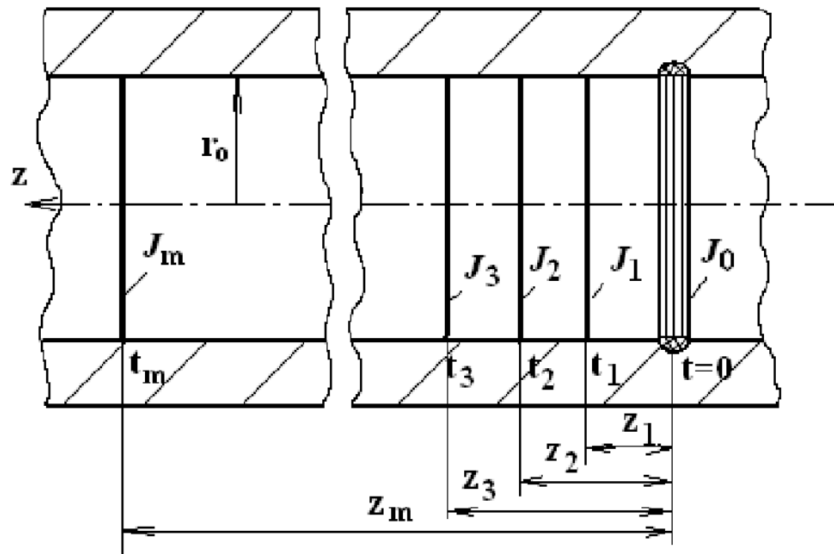


Figure 1 – Diagram for calculating heat accumulation in a body with an opening

Even earlier, at time $t_2 = 2t_1$ and at a distance $z_2=2z_1$, the ring source J_2 was active, and so on, until the first instantaneous ring pulse J_m occurred at time $t_m=2\pi m/\omega$ at position $z_m=mS$. According to the adopted scheme, the accumulation of heat in the part can be represented as an increase in the temperature of the local field due to the contribution of each instantaneous ring source, i.e.,

$$\theta_0 = \sum_{i=1}^m \theta_i(J_i).$$

Since the increase in the temperature of the local field from each source is determined over a relatively short period of time, the temperature of the general field can be calculated using relation (3). By setting $r=r_0$, $t_i=2\pi m/\omega$, and $z_i=mS$, we obtain the following expression:

$$\theta_0 = \frac{Q}{16\pi^3 \lambda r_0} \sum_{i=1}^m \frac{\omega}{m_i} \exp \left[-\frac{\omega S^2}{8\pi a} \cdot m_i \right]. \quad (4)$$

The effect of heat flow, which is taken into account when modelling the process in an infinite body, can be considered using relation (1). In this case, we should set $r'=0$, $r=r_0$, $z=z_i$, $t=t_i$ and $I_0(0)=1$. As a result, it follows that the decrease in the temperature of the local field over m revolutions of the heat source ($t_1=2\pi m/\omega$, $z_i=mS$) is determined by the following relation:

$$\theta_c = \frac{-Q_c}{8c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\omega}{2\pi m_i} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[-\omega \frac{r_0^2 + (Sm_i)^2}{8\pi a m_i} \right] \quad (5)$$

Thus, in accordance with the imaging technique for a body internally bounded by an opening, the local field in the region affected by a normal toroidal source is calculated using formula (3); the increase in the temperature of the local field due to heat accumulation is determined by the ratio of the total temperature field (4), while the decrease in the temperature of the local field caused by heat flow for each of the m_i ring sources is calculated using formula (5).

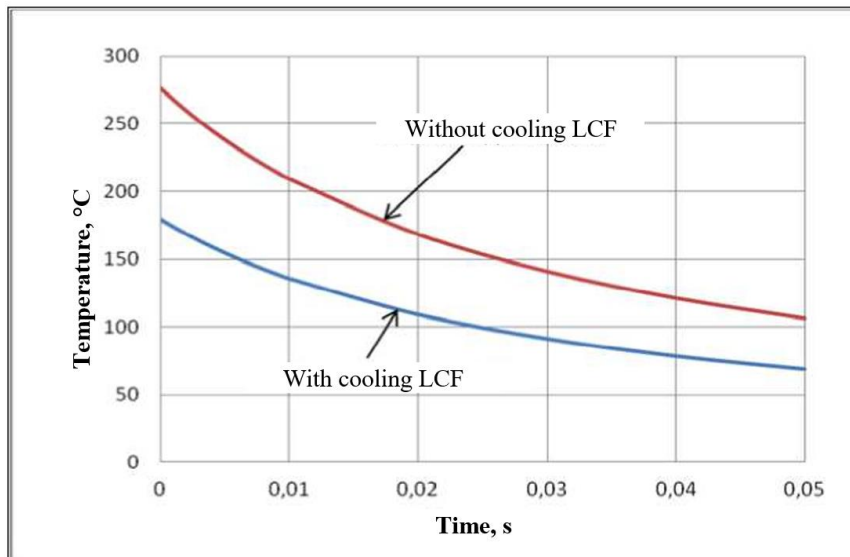


Figure 2 – Dependence of the temperature on the surface of the hole on time during drilling of steel 45

$$\left(\lambda=60 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}; a=0,08 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}; cp=5,02 \cdot 10^6 \frac{J}{m^2 \cdot ^\circ C}; R=2,5 \cdot 10^{-3} m; P_0=2174 H; k=2\pi; z=0 \right)$$

Fig. 3 and Fig. 4 show the level of heat accumulation in the part and the effect of heat flow for the following process parameters: $r_0=0,01 m$; $V = 25 m/s$; $S = 0.25 mm/rev$ during the processing of steel 45.

As the calculations show, a slight increase in the local field temperature is influenced by slightly more than 6 revolutions of the source (Fig. 3). As can be seen from Fig. 4, concentrated heat flow does not affect the machining of a 10 mm diameter hole; the effect appears when $r_0 < 5mm$.

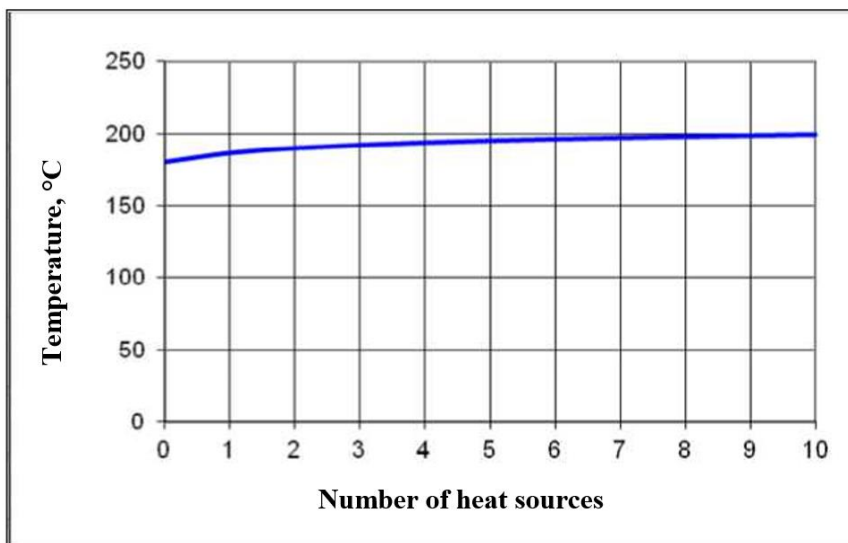


Figure 3 – Effect of heat accumulation on the surface temperature of the hole

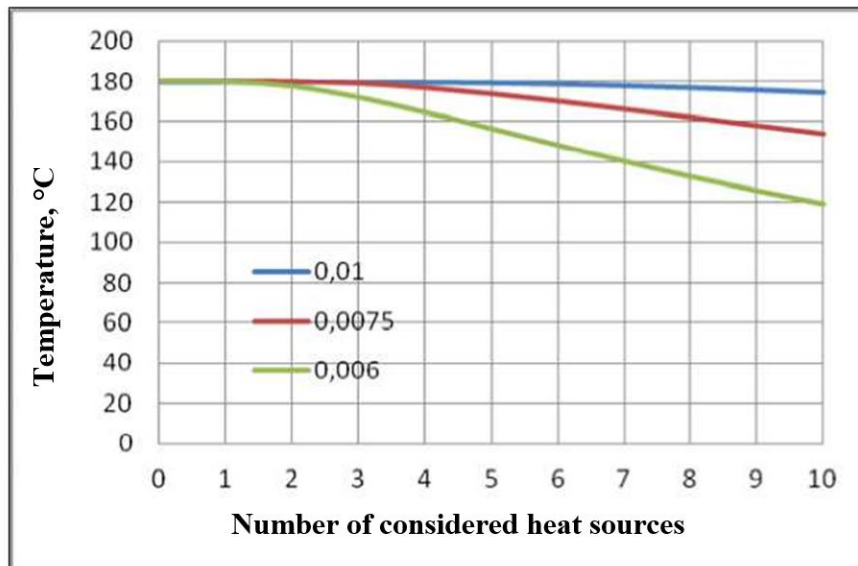


Figure 4 – Effect of heat flow on the temperature at the centre of a normal toroidal source depending on the radius of the ring source ($r_0=0.01$ m, $r_0=0.005$ m, $r_0=0.004$ m)

As part of the scientific work, deep holes with diameters of 10 and 20 mm were drilled using special deep drilling bits. The processing was carried out on a universal lathe model 16K20, which was modernised for deep drilling. During drilling, an experimental study was conducted on the temperature in the tool-workpiece contact zone, as well as the heat distribution in the workpiece, since, according to [6, 7], during drilling, about 75% of the heat is transferred to the workpiece.

The features of various methods of experimental study of thermal phenomena (the pyrometric method [8], the method of artificial and natural thermocouples, the method of heat-sensitive paints, the method of melting pure metals, and others [9, 10]) were analysed, and it was proposed to measure the temperature using the artificial thermocouple method.

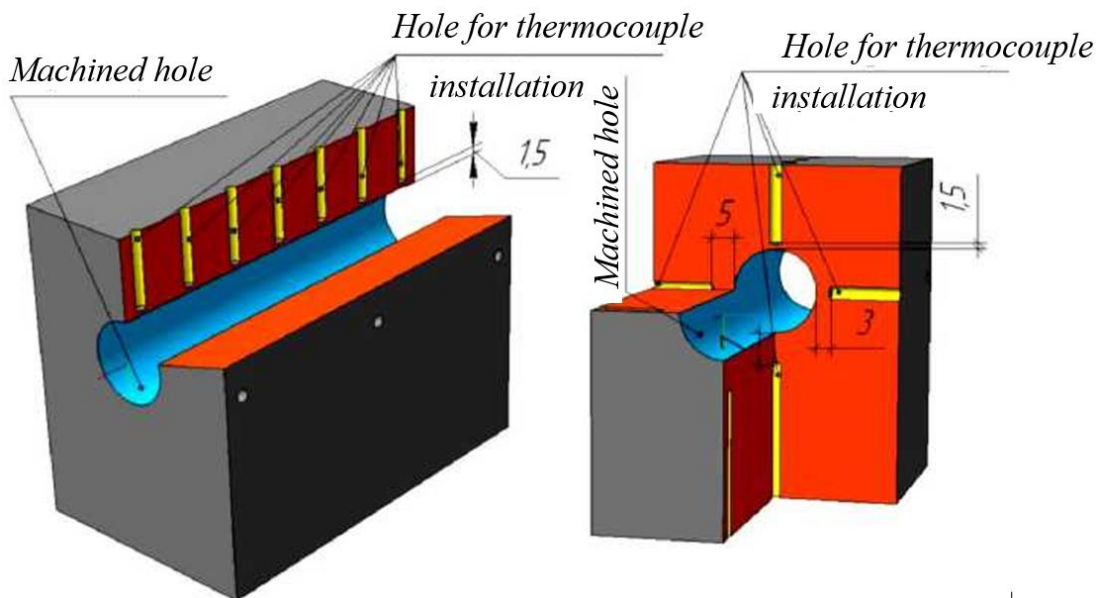


Figure 5 – Layout of channels for installing thermocouples in the workpiece

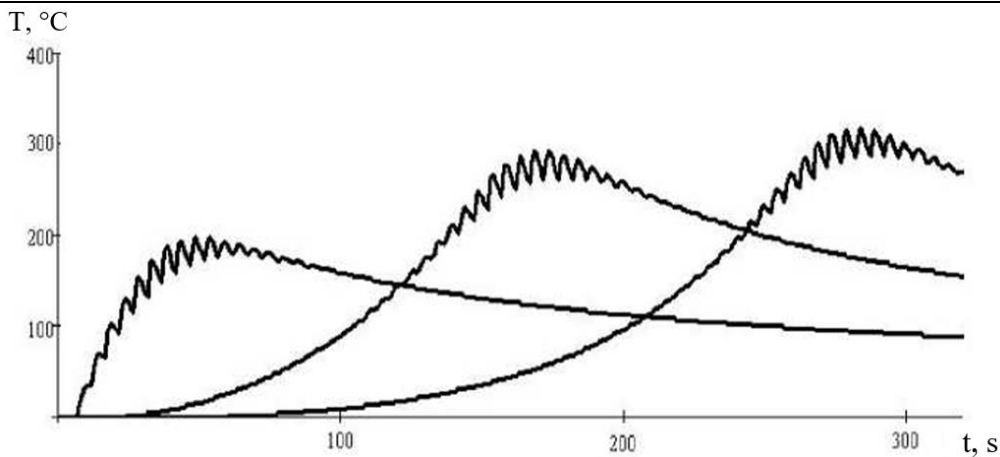


Figure 6 – Temperature change graphs for points located at different distances from the end of the workpiece

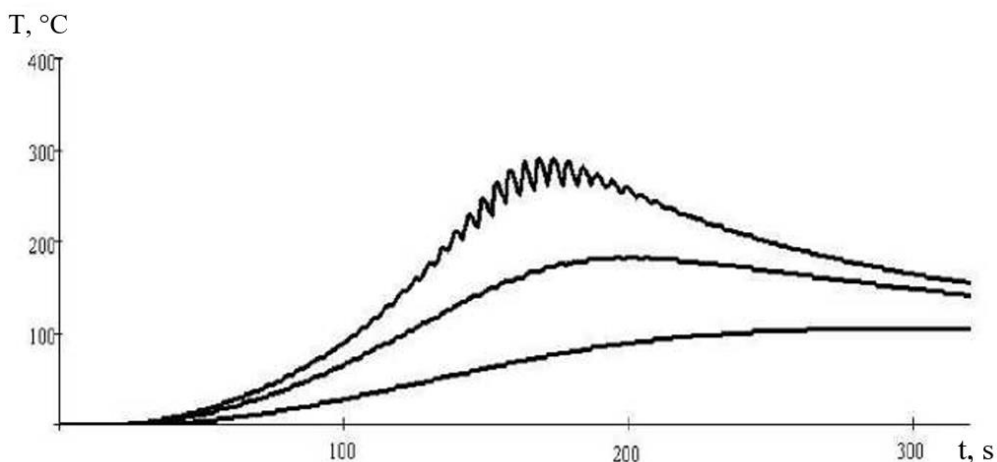


Figure 7 – Temperature change graphs for points located at different depths from the surface of the hole

Since theoretical research has shown that the maximum temperature should not exceed 300 °C (without CLF cooling) and 180 °C (with CLF cooling), standard chromel-alumel thermocouples were used to measure the temperature. The thermocouples were inserted through holes with a diameter of 2 mm into the processing zone in accordance with the developed scheme (Fig. 5), which made it possible to monitor the temperature variation in the material along the axis of the hole, as well as in the plane perpendicular to the axis of the hole. The temperature in the tool-part contact zone could then be theoretically determined based on the experimentally obtained temperature gradient (Fig. 6 and Fig. 7).

CONCLUSIONS

The method of imaging an axisymmetric temperature field in a body internally bounded by a cylindrical hole as an adequate thermal regime in an unbounded body using fictitious (reflected) heat sources has been substantiated.

It is shown that the thermal regime in a body with an opening that arose during mechanical processing can be conditionally divided into local and general temperature fields, with the local field determining the temperature directly in the area of action of the local source, and the general temperature field determining the increase in the thermal stress of the local field due to the accumulation of heat in the processed part.

The adequacy of the proposed mathematical model has been experimentally verified.

REFERENCES

1. Bogdanov, O. O., Derbaba, V. A., Dubrovsky, S. S., Ruban, V. M., & Nazarenko, N. S. (2023). *Research on cutting temperature during turning of high-hardness cast irons. Collection of scientific papers of NSU*, 75(4), P. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.044>
2. Cichosz Piotr, Paweł Karolczak, and Kamil Waszczuk (2023). Review of Cutting Temperature Measurement Methods. *Materials*, 16(19), 6365. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16196365>

3. Gugnin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., Goloborodko, V. (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) *Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. Pp 279-289. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25
4. Kanagaraju, T., et al (2016). Optimization of Drilling Parameters for Thrust Force and Torque in Friction Drilling Process. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 24(4), P. 1577-1582. DOI: [10.5829/idosi.mejsr.2016.24.04.23391](https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2016.24.04.23391)
5. Kolesnyk, V.; Peterka, J. et al (2020). Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Material*, 13(17), DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13143232>
6. Masahiko Sato, Tomoyuki Aoki, Hisataka Tanaka, Satoshi Takeda (2013). Variation of Temperature at the Bottom Surface of a Hole During Drilling and its Effect on Tool Wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 68, P. 40-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.01.007>
7. R. Redko et al. (2023). Investigation of Cutting Force During Boring of Screw Non-Rigid Machine Parts. / *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 20(1), P. 26-32. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1030>
8. Stupnytskyi, V.V. (2013). Thermodynamic Pattern of the Workpiece Machining by the Rheological Imitation Modelling in Deform-3D System. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument making*, (772), P. 102-114.
9. Toulouevski, Yuri N., and Ilyaz Y. Zinurov (2013). The Fundamental Laws and Calculating Formulae of Heat Transfer Processes. *Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, P. 33-66.
10. Zubovetska N.T., Redko R.H., Chetverzhuk T.I., et al (2025). Experimental Study of the Process of Boring Machine Parts Using a Cutter Equipped with Tensor Sensors. *Scientific bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 1(58), P. 88-96. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1\(58\)-88-96](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1(58)-88-96)

Полінкевич Р., Зубовецька Н., Редько Р., Четвержук Т., Залета О., Валецький Б., Пилипець М. Дослідження температурних процесів при свердлінні отворів.

У статті вирішено осесиметричне теплофізичне завдання при свердлінні глибоких отворів на основі запропонованої математичної моделі розрахунку температури за методом джерел тепла з використанням принципів просторово-часової відповідності та місцевого впливу. Визначено залежності теплового процесу, які залежать від взаємного розташування ріжучого інструменту та оброблюваної деталі, матеріалу заготовки, наявності охолодження мастильно-охолоджувальною рідиною, режимів різання, відведенням стружки та часу перебігу самої технологічної операції свердління. Це особливо важливо для глибокого свердління, де джерело тепла постійно зміщується. Встановлено, що розрахунок температурного поля оброблюваної деталі залежить від дії джерела теплоти у формі кільця з рівномірним розподілом інтенсивності тепловиділення.

Теоретичне дослідження показало, що максимальна температура не повинна перевищувати 300 °C (без охолодження МОР) і 180 °C (при охолодженні МОР), відповідно для вимірювання температури використовувалися стандартні термомари типу хромель-алюмель (діапазон вимірювання температури від -100 °C до +1000 °C).

Експериментально проведено свердління глибоких отворів діаметрами 10 та 20 мм в деталі з матеріалу Сталь 45 (аналоги С45Е та Ск45 згідно стандарту Євросоюзу EN 10083-2) спеціальними свердлами для глибокого свердління. Обробка здійснювалася на універсальному токарному верстаті моделі 16К20, модернізованому для глибокого свердління. Розраховано температуру в зоні контакту інструмент-деталь, а також розподіл температури в тілі заготовки (температурний градієнт). Доведено адекватність запропонованої математичної моделі, а розраховані значення температур відповідають отриманим експериментальним даним.

Ключові слова: теплове джерело, глибоке свердління, теплопровідність, метод джерел тепла, принцип просторово-часової відповідності.

ПОЛІНКЕВИЧ Роман Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: r.polinkevych@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4243-5585>.

ЗУБОВЕЦЬКА Наталія Тарасівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: n.zubovetska@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3101-3299>

РЕДЬКО Ростислав Григорович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: redkorg@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5066-0224>.

ЧЕТВЕРЖУК Тарас Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: eti_tar@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4445-4632>.

ЗАЛЕТА Ольга Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: olga_zaleta@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0777-9972>.

ВАЛЕЦЬКИЙ Богдан Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: b.valetsky@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7704-5253>.

ПИЛИПЕЦЬ Михайло Львович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, e-mail: pulupecmi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4286-9324>

Roman POLINKEVICH – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: r.polinkevych@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4243-5585>.

Nataliia ZUBOVETSKA – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: n.zubovetska@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3101-3299>

Rostyslav REDKO – PhD in Engineering, associate professor, head of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: redkorg@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5066-0224>.

Taras CHETVERZHUK – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: eti_tar@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4445-4632>.

Olha ZALETA – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: olga_zaleta@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0777-9972>.

Bohdan VALETSKYI – PhD in Engineering, associate professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: b.valetsky@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7704-5253>.

Mikhail PYLYPETS – Doctor of Science in Engineering, professor of Applied Mechanics and Mechatronics department, Lutsk National Technical University e-mail: pulupecmi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4286-9324>.

Дата надходження статті до видання: 16.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1944

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 Murovaniy, 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 2 (25), 2025 Volume 2 (25), 2025

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.