

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

№27 2025

Collected scientific papers ISSN 2313-5352



**ПЕРСПЕКТИВНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ ТА  
ПРИЛАДИ**

**PERSPECTIVE  
TECHNOLOGIES AND  
DEVICES**



Перспективні технології та прилади № 27 2025

**ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ**

**DOI 10.36910/6775-2313-5352-2025-27**

Збірник наукових праць

Випуск 27  
(грудень, 2025)

УДК 004, 006, 519, 539, 616, 620, 621, 631, 681

Рекомендовано до друку науково-технічною радою Луцького національного технічного університету, протокол №5 від 22 грудня 2025 р.

Зареєстрований Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення №40 від 11.01.2024 р.). Ідентифікатор R30-02458. ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» м. Луцьк, грудень 2025 р. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 222 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, інформаційно-вимірювальних технологій та телекомунікацій, електроніки; вимірювальної та радіотехніки, особливості експлуатації та перевірки засобів вимірювань, медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Контактна інформація:

Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, факультет комп'ютерних та інформаційних технологій, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Телефон: (050) 378-82-31

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

<b>ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ</b>	
<b>Марчук Віктор Іванович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
<b>ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА</b>	
<b>Четвержук Тарас Іванович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
<b>ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР:</b>	
<b>Пташенчук Віталій Віталійович</b> , кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.	
<b>Валецький Богдан Петрович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.	
<b>РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ</b>	
1	<b>Заболотний Олег Васильович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
2	<b>Захаров Ігор Петрович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
3	<b>Антонюк Віктор Степанович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
4	<b>Гераймчук Михайло Дем'янович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
5	<b>Гайдук Мікулас (Hajduk Mikuláš)</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри робототехніки, Технічний університет Кошице, Slovakia.
6	<b>Редько Ростислав Григорович</b> , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
7	<b>Повстяной Олександр Юрійович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
8	<b>Ларшин Василь Петрович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в інжинірингу, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
9	<b>Антоній Свіць (Antoni Shwic)</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатизації та роботизації продукції, Люблінська політехніка, Poland.
10	<b>Богуш Вісніці (Bogusz Wisnicki)</b> , PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
11	<b>Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek)</b> , PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецинська морська академія, Poland.
12	<b>Станіслав Іван (Stanislaw Iwan)</b> , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
13	<b>Збігнев Матушак (Zbigniew Matuszak)</b> , доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Poland.
14	<b>Андрушак Ігор Євгенович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Луцький національний технічний університет, Україна.
15	<b>Ткачук Анатолій Анатолійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
16	<b>Гулай Любомир Дмитрович</b> , доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
17	<b>Денисюк Віктор Юрійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
18	<b>Коломієць Леонід Володимирович</b> , доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна.
19	<b>Куц Юрій Васильович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
20	<b>Лапченко Юрій Сергійович</b> , кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
21	<b>Луців Ігор Володимирович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної інженерії, Державний університет «Житомирська політехніка», Україна.
22	<b>Марек Опеляк (Marek Opielak)</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчового машинобудування, Люблінська політехніка, Poland.
23	<b>Мірослав Пайор (Miroslaw Pajor)</b> , доктор технічних наук, професор, декан факультету механічної інженерії та мехатроніки, Західнопоморський технічний університет, Poland.

24	<b>Приступа Станіслав Олексійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
25	<b>Пермяков Олександр Анатолійович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізючі верстати, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут», Україна.
26	<b>Середюк Орест Євгенович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.
27	<b>Тимчик Григорій Семенович</b> , доктор технічних наук, професор, декан приладобудівного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
28	<b>Ткачук Роман Андрійович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
29	<b>Тонконогий Володимир Михайлович</b> , доктор технічних наук, професор, директор Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, Національний університет «Одеська політехніка», Україна.
30	<b>Федосов Сергій Анатолійович</b> , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики Луцький національний технічний університет, Україна
31	<b>Яворський Богдан Іванович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
32	<b>Ярошевич Микола Павлович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
33	<b>Григор'єва Наталія Сергіївна</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки, Луцький національний технічний університет, Україна.
34	<b>Тулашвілі Юрій Йосипович</b> , доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук, Луцький національний технічний університет, Україна.
35	<b>Захарчук Віктор Іванович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
36	<b>Пальчевський Богдан Олексійович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
37	<b>Решетило Олександр Миколайович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
38	<b>Гуменок Лариса Олександрівна</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
39	<b>Кайдик Олег Леонтійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки, Луцький національний технічний університет, Україна.
40	<b>Маркіна Людмила Миколаївна</b> , кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, Україна.
41	<b>Дагмар Цаганова (Dagmar Caganova)</b> , Prof. M.A., Ph.D., Institute of Industrial Engineering and Management, Faculty of Materials Science and Technology STU, Slovakia
42	<b>Євсюк Микола Миколайович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
43	<b>Хвищун Микола В'ячеславович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
44	<b>Заблоцький Валентин Юрійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
45	<b>Селепина Йосип Романович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
46	<b>Мороз Сергій Анатолійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
47	<b>Лищук Віктор Васильович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
48	<b>Луньов Сергій Валентинович</b> , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики, Луцький національний технічний університет, Україна.
49	<b>Павло Комада (Paweł Komada)</b> , dr hab. inż., katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Lubelska, Poland

ЗМІСТ	
<b>Kovalyk S., Khvostivskiy M.</b> METHOD AND ALGORITHM OF WINDOWED PROCESSING OF EMG AND PIEZOELECTRIC SIGNALS FOR THE FORMATION OF CONTROL ACTIONS IN BIOPROSTHESES.....	6
<b>Stukhliak P., Totosko O., Stukhliak D., Zoloty R., Gypka A., Didunik O.</b> DEVICE FOR AUTOMATED TESTING OF EPOXY COMPOSITE COATINGS FOR THE STRENGTH OF ADHESIVE BONDS.....	13
<b>Totosko O., Stukhliak D., Stukhliak P., Verbytskyy O.</b> Hardware–Software Platform Architecture for Cloud Computing Acceleration Using FPGA.....	20
<b>Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Бучинський В. М., Никитюк А. Г., Брикса А. О.</b> РОЗРОБЛЕННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З МІКРОХВИЛЬОВИМИ ОБ'ЄМНИМИ НАГРІВАЧАМИ ОСНАЩЕНОЇ ШНЕКАМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ, ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА РОЗПУШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ.....	25
<b>Грабар І. Г., Жуковський О. Є.</b> АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ МЕХАНІЧНО ПОЄДНАНИХ ВАЛІВ З ПЕРЕМІННИМ ЦЕНТРОМ МАС ОДНОГО З НИХ НА ПРИКЛАДІ КАРТОРОБНОЇ МАШИНИ «DORIS».....	35
<b>Денисюк В. Ю.</b> МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ БЛОКІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІТИКО-ЙМОВІРНІСНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ.....	44
<b>Євсюк М. М., Якимчук Н. М., Стаднюк А. Ю.</b> МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ ZABBIX.....	52
<b>Журавська І. М., Тонха О. Л., Нечай І. В., Гуменюк Т. В.</b> КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В ПРОСТОРОВОМУ КОРИДОРІ НА БАЗІ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ.....	58
<b>Іванюта О. Я., Гуменюк Л. О.</b> КЛАСИФІКАЦІЯ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ.....	70
<b>Каменєва Ю. В., Федосов С. А., Новосад О. В.</b> ЦИФРОВІ ФІЛЬТРИ У СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ.....	77
<b>Карась В. І., Драган А. П.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛИВУ НАЦІОНАЛЬНОЇ І МІЖНАРОДНОЇ СТАНДАРТИЗАЦІЇ НА РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ.....	83
<b>Кепещук Т. В., Малісевич В. В., Пастущин Л. Б., Мислицький В. В.</b> МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ АВТОКЛАВІВ ТА СТЕРИЛІЗАТОРІВ .....	89
<b>Клендій М. Б., Драган А. П., Пилипець М. І.</b> ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА ІЗ СЕКЦІЙНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ.....	98
<b>Кубай А. М., Пташенчук В. В., Красовський В. В.</b> ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА НА БАЗІ ПРОФІЛОГРАФА-ПРОФІЛОМЕТРА 252.....	103
<b>Маркіна Л. М., Чорнобай М. В., Сацик В. О., Смолянкін О. О.</b> КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ І КОНТРОЛЮ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ.....	108

<b>Марчук В. І., Денисюк В. Ю., Пилипець М. І.</b> ПРОЄКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУПОЛОПОДІБНОГО ТИПУ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ.....	<b>116</b>
<b>Мережа А. С., Пташенчук В. В.</b> ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ...	<b>126</b>
<b>Микитюк М. П., Островський І. П.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В НАНОСТРУКТУРАХ $VI_2SE_3$ .....	<b>132</b>
<b>Новосад К. С., Никируй Л. І., Яремій І. П., Федосов С. А.</b> АНАЛОГОВІ І ЦИФРОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ.....	<b>138</b>
<b>Олещук Т. С., Гуменюк Л. О.</b> МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ.....	<b>143</b>
<b>Пилипець М. І., Денисюк В. Ю.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОКООРДИНАТНИХ П'ЄЗОПРИВОД- НИХ СКАНЕРІВ.....	<b>148</b>
<b>Сацик В. О., Маркіна Л. М., Копчунь А. О., Сацик О. В.</b> АНАЛІЗ РОБОТИ ТА НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА НА БАЗІ ПРОШИВКИ BETAFLIGHT.....	<b>157</b>
<b>Смолянкін О. О., Маркіна Л. М.</b> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ RASPBERRY PI З ВИКОРИСТАННЯМ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА NODE-RED.....	<b>166</b>
<b>Татарчук Д. Д., Богдан О. В., Діденко Ю. В., Лупина Б. І., Жеребець О. М.</b> МІКРОМЕХАНІЧНИЙ КАЛОРИМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР КОЛИВАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЧАСТИНОК ГАЗУ ДЛЯ ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА БПЛА.....	<b>171</b>
<b>Тимків П. О., Гевко О. В., Петров В. В.</b> ІНТЕГРОВАНА ПУПІЛОМЕТРІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ.....	<b>177</b>
<b>Уніят С. В., Хвостівський М. О.</b> АДАПТИВНИЙ ФАЗОВО-КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ВІДНОВЛЕННЯ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ ПІСЛЯ ФІЗИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ПУЛЬСОВИМИ СИГНАЛАМИ.....	<b>185</b>
<b>Чалий В. Д., Мороз С. А., Лишук В. В., Приступа С. О., Євсюк М. М.</b> ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ ДАВАЧІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	<b>192</b>
<b>Шишковський С. О., Гуменюк Л. О.</b> МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ ВОЛОНТЕРІВ ПІД ЧАС КАТАСТРОФ.....	<b>199</b>
<b>Якимчук Н. М., Лукомський І. В.</b> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА.....	<b>205</b>
<b>Янюк Д. В.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ВЕЛИЧИН АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ДОВГОМІРНОЇ ПРУТКОВОЇ ЗАГОТОВКИ У ВЕРСТАТ.....	<b>213</b>

UDC 616-71:004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-1

**Kovalyk S., Khvostivskyi M.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## METHOD AND ALGORITHM OF WINDOWED PROCESSING OF EMG AND PIEZOELECTRIC SIGNALS FOR THE FORMATION OF CONTROL ACTIONS IN BIOPROSTHESES

*The paper presents a window-based method for processing biosignals to generate control actions in upper-limb bioprostheses operating in real time. The core of the method is the segmentation of EMG and piezoelectric signals into short time windows of 40-80 ms with partial overlap, ensuring continuous information updating and minimal system response latency (<50 ms). The EMG signal serves as the primary channel of user intent, while the piezoelectric signal functions as a sensory feedback channel. For each window, noise filtering, root mean square (RMS) calculation, envelope extraction using the Hilbert transform, and exponential smoothing are performed. The piezoelectric signal is introduced into the system with a temporal delay of 30-70 ms, replicating the natural sensorimotor loop «intention – action – contact – correction». Based on the smoothed EMG and delayed piezo signals, a control signal is generated and applied to the actuator motor, taking into account its electrical and mechanical dynamics. The proposed method combines windowed processing and sensory delay in a unified algorithm that enhances the stability, smoothness, and physiological compliance of control, suppresses random spikes, and ensures adaptability under varying conditions. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach for accurate and reliable control of next-generation bioprostheses.*

**Key words:** *EMG signal, piezoelectric signal, bioprosthesis, motor, windowed processing, sensory feedback, real-time operation, Hilbert transform, control signal, control stability, adaptive systems, Matlab.*

**Problem statement.** The control of modern upper-limb bioprostheses is a challenging task, as it must ensure natural movement, low reaction latency, and intuitive operation for the user. The primary source of control information is traditionally electromyographic (EMG) signals, which reflect the level of muscle activity, while additional sensory signals (force, piezoelectric, tactile) are used to implement closed-loop sensorimotor feedback [1-3]. However, reliable real-time biosignal processing remains an open and unresolved problem.

**Analysis of the state of research.** The first approaches to control were based on threshold algorithms, where the decision was made based on the excess of the EMG signal amplitude over a given threshold. Such methods were distinguished by their simplicity of implementation, but had low functionality and sensitivity to noise [4]. Further development is associated with pattern recognition methods (Pattern Recognition, PR), in which classifiers (LDA, SVM, neural networks) are used to identify gestures based on statistical and spectral features of EMG. This provided multifunctional control, but turned out to be insufficiently resistant to changes in the position of the electrodes, muscle fatigue, and individual differences of users [5].

To enhance the intuitiveness of control, regression-based approaches have been developed, allowing proportional control of force or movement speed. Despite the naturalness of this method, it requires stable features and remains sensitive to signal dynamics [5]. At the same time, researchers have proposed adaptive algorithms and online learning systems capable of adjusting classifier parameters in real time, which reduces the number of erroneous switches and shortens user reaction time [6].

Recently, particular attention has been given to feedback systems that integrate sensory signals (force, tactile, piezoelectric) into closed-loop control. This integration enhances grip force regulation and compensates for signal uncertainty, as confirmed by numerous experimental studies [7]. As a result, a class of hybrid methods has emerged, combining EMG as a command channel with sensory feedback within a unified algorithm. One such approach involves windowed processing of EMG and piezoelectric signals, incorporating a time delay in the sensory channel to model the natural sensorimotor loop and ensure smooth and stable operation of the prosthetic device.

Despite significant progress, most existing methods have limitations: high sensitivity to signal recording conditions, instability during prolonged use, insufficient response speed, or low smoothness

of control. Therefore, the search for algorithms that achieve a balance between low latency, robustness to noise, and physiological plausibility of control remains a relevant and ongoing challenge.

**Objective of the Study.** The aim of this work is to develop and investigate a method and algorithm for windowed processing of EMG and piezoelectric signals to generate control actions for a prosthetic device, taking into account sensory feedback and its time delay. This approach is intended to enhance the stability and naturalness of control.

**Results and Discussion.** The upper-limb prosthesis control system operates in real time, implementing a data processing sequence within sliding time windows. Each window, with a duration of  $\Delta t$  (40–80 ms), contains discretized samples of the EMG and piezoelectric signals, which are accumulated in buffers with partial overlap.

After the completion of each window:

- noise filtering and signal normalization;
- calculation of their local features (envelope, root mean square value, and energy);
- generation of intermediate variables representing the level of muscle activity (EMG signal) and contact force (piezoelectric signal);
- synthesis of the control action taking into account the time delay of sensory feedback.

This approach ensures continuous information updating, minimal latency (<50 ms), and stable control without high-frequency oscillations.

The EMG signal  $\xi_{EMG}(t)$  serves as the primary channel of the user's intent. Its amplitude fluctuations reflect the level of muscle contraction but also contain noise and random components.

To obtain a stable and controllable parameter, windowed integration is employed:

$$E_{EMG}(t_k) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k - \Delta t}^{t_k} |\xi_{EMG}(\tau)| d\tau, \quad (1)$$

where  $\Delta t$  – window duration,  $t_k$  – update moment (every  $\delta t = \Delta t/4 \dots \Delta t/2$ ).

Thus, a moving average (MA) amplitude is formed (1), providing a rapid estimate of the current muscle activity.

For a more accurate estimation of the envelope, the Hilbert transform is applied, yielding the analytic signal:

$$\tilde{\xi}_{EMG}(t) = \xi_{EMG}(t) + jH(\xi_{EMG}(t)), \quad (2)$$

$$E_{EMG}(t) = \left| \tilde{\xi}_{EMG}(t) \right| + \sqrt{\xi_{EMG}^2(t) + H^2(\xi_{EMG}(t))}, \quad (3)$$

The obtained envelope  $E_{EMG}(t)$  (2-3) undergoes windowed smoothing using an exponential filter:

$$E_{EMG,win}(t_k) = (1 - \lambda)E_{EMG,win}(t_{k-1}) + \lambda E_{EMG}(t_k), \quad (4)$$

where  $\lambda = \delta t / \Delta t$  determines the update rate.

The result is a smooth estimate of muscle activity that is updated in real time while preserving the physiological inertia of the biomechanical response.

The piezoelectric signal  $\xi_P(t)$  reflects the interaction force between the prosthesis and the object. Its raw form contains both a useful low-frequency component (pressure) and high-frequency fluctuations (vibrations, micro-slips).

A similar windowed processing is applied to extract the informative component:

$$E_P(t_k) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k - \Delta t}^{t_k} |\xi_P(\tau)| d\tau, \quad (5)$$

after which the envelope is constructed using the Hilbert transform:

$$E_{P,env}(t_k) = |\xi_P(\tau) + jH(\xi_P(\tau))|. \quad (6)$$

To stabilize the result (6), moving smoothing within a window of duration  $\Delta t$  is applied, similar to the EMG channel.

Since the piezoelectric signal reflects the environmental response, it always appears with a delay relative to the moment of muscle impulse generation.

Therefore, a time delay  $\tau_d$  (30-70 ms) is introduced into the system to model the natural delay of human sensory feedback.

The delayed signal is described as:

$$E_{P,del}(t_k) = \xi_{P,env}(t_k - \tau_d). \quad (7)$$

The choice of  $\tau_d$  depends on the mechanical inertia of the prosthesis and the characteristics of the sensors.

– smaller  $\tau_d$ : faster response but higher likelihood of oscillations;

– larger  $\tau_d$ : more stable, but with reduced response speed.

Experiments have shown that the optimal value of  $\tau_d=40-60$  ms provides the best compromise between accuracy and stability.

After obtaining the smoothed values  $E_{EMG,win}(t)$  (4) and  $E_{P,del}(t)$  (7), a combined control signal  $U_{ctrl}(t)$  is generated, which determines the actuation of the prosthetic motor.

It combines the user's active command (EMG signal) with the corrective action from sensory feedback (piezoelectric signal):

$$E_{ctrl}(t_k) = \alpha E_{EMG,win}(t_k) - \beta E_{P,del}(t_k), \quad (8)$$

where  $\alpha$  – gain coefficient of the muscle channel, which determines sensitivity to the user's intent;

$\beta$  – sensory correction coefficient, which defines the response level to contact force.

Thus:

– if the gripping force is insufficient ( $E_P$  is small) – the system increases  $U_{ctrl}$  and increases the force;

– if the force exceeds the permissible value, the piezo channel corrects the action by reducing the motor voltage

For smooth regulation, both coefficients in expression (8) can be adaptive ( $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ) and vary depending on the movement dynamics or the type of object.

The generated signal  $U_{ctrl}(t)$  is applied to the actuator – a DC motor. Its electrical dynamics are described by the equation:

$$L \frac{di}{dt} + Ri(t) + K_e \omega(t) = U_{ctrl}(t), \quad (9)$$

where  $i(t)$  – armature current;

$\omega(t)$  – rotor angular velocity;

$L$  – winding inductance;

$R$  – winding resistance;

$K_e$  – back EMF coefficient

The electromagnetic torque  $M(t)$  of the motor is a function of the current:

$$M(t) = K_t i(t). \quad (10)$$

The rotor's mechanical dynamics are governed by the following equation:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega(t) = M(t) - M_{load}(t), \quad (11)$$

where  $J$  – moment of inertia,  $B$  – viscous friction coefficient,  $M_{load}$  – load torque from the gripping mechanism.

Conversion of torque into force and finger motion velocity:

$$F(t) = k_f i(t), \quad v(t) = k_v \omega(t), \quad (12)$$

where  $F(t)$  – grip force,  $v(t)$  – linear velocity of the limb.

These parameters in expression (12) are monitored in real time by piezoelectric sensors and influence the subsequent correction of the control signal  $U_{ctrl}(t)$  (9).

In the closed-loop control system, the EMG signal serves as the direct command channel, whereas the piezoelectric signal functions as the sensory feedback channel with a time delay.

This structure implements a bioinspired principle: intention → motion → contact → sensory correction → stabilized movement.

In mathematical form, such a loop can be represented as:

$$\begin{cases} E_{EMG,win}(t) = f_1(\xi_{EMG}(t)), \\ E_{P,del}(t) = f_2(\xi_P(t - \tau_d)), \\ U_{ctrl}(t) = \alpha E_{EMG,win}(t) - \beta E_{P,del}(t) \\ i(t) = \frac{1}{L} [U_{ctrl}(t) - Ri(t) - K_e \omega(t)] \\ \omega(t) = \frac{1}{J} [K_t i(t) - B\omega(t) - M_{load}(t)] \end{cases} \quad (13)$$

The resulting system of equations (13) describes the full dynamics of the prosthesis in real time, taking into account windowed processing, sensory delay, and electromechanical characteristics.

Advantages of the windowed approach for generating the control action:

- Increased stability: short windows attenuate noise and prevent motor overloading during accidental signal peaks.
- Smooth control: thanks to window overlap, the system updates  $U_{ctrl}$  smoothly, without abrupt changes in armature voltage or current.
- True adaptability: windowed processing provides flexible response even under changing contact or electrode conditions, without the need for complete recalculation of the filters.
- Physiological relevance: processing signals in time windows models natural human sensorimotor cycles (~50-100 ms), making control intuitively perceived by the user.

Taking into account all processing stages, the complete expression for the control action can be represented as:

$$U_{ctrl}(t_k) = \alpha \left[ \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k - \Delta t}^{t_k} |\xi_{EMG}(\tau)| d\tau \right] - \beta \left[ \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k - \Delta t - \tau_d}^{t_k - \tau_d} |\xi_P(\tau)| d\tau \right], \quad (14)$$

This equation (14) describes the real-time model of the bioprosthesis operation, in which the EMG signal determines the user's intended action, while the delayed piezoelectric signal provides its sensory correction.

Figure 1 shows the algorithm for windowed processing of EMG and piezoelectric signals with partial window overlap ( $\Delta t=40-80$  ms) and exponential smoothing.

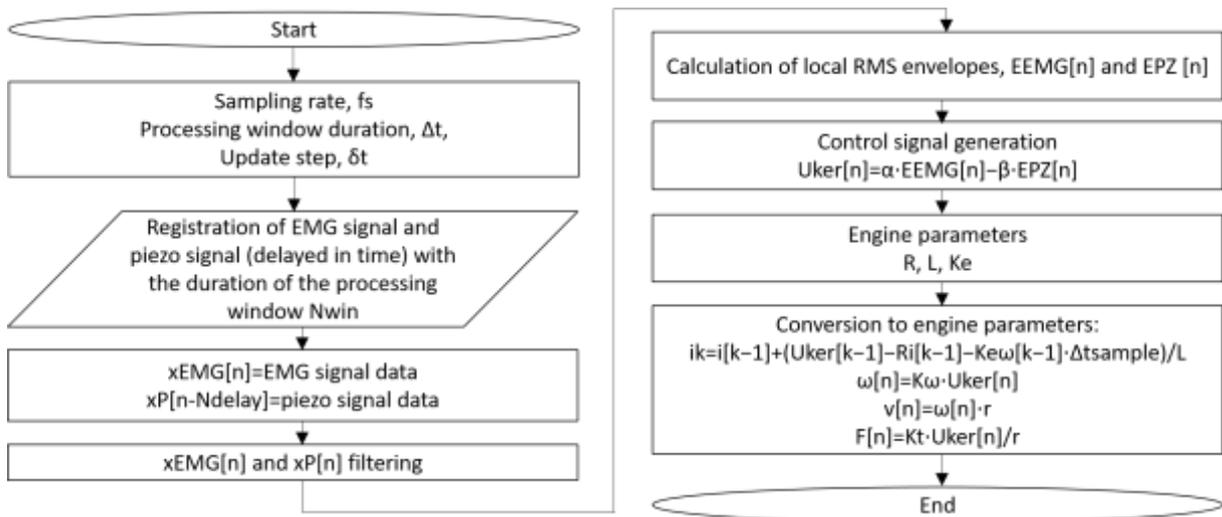


Figure 1 – Algorithm of windowed processing of EMG and piezoelectric signals for generating the control action of a bioprosthesis

The algorithm includes the stages of recording EMG and piezoelectric signals, their filtering, extraction of signal envelopes via the Hilbert transform, consideration of sensory delay in the piezoelectric channel, computation of the control signal, and accounting for the electromechanical dynamics of the prosthesis actuator. This sequence ensures continuous signal processing, minimal reaction delay, and stable real-time control.

The result of the study of the method in the Matlab environment is shown in Fig. 2 in the form of control signals for the bioprosthesis, in particular its motors.

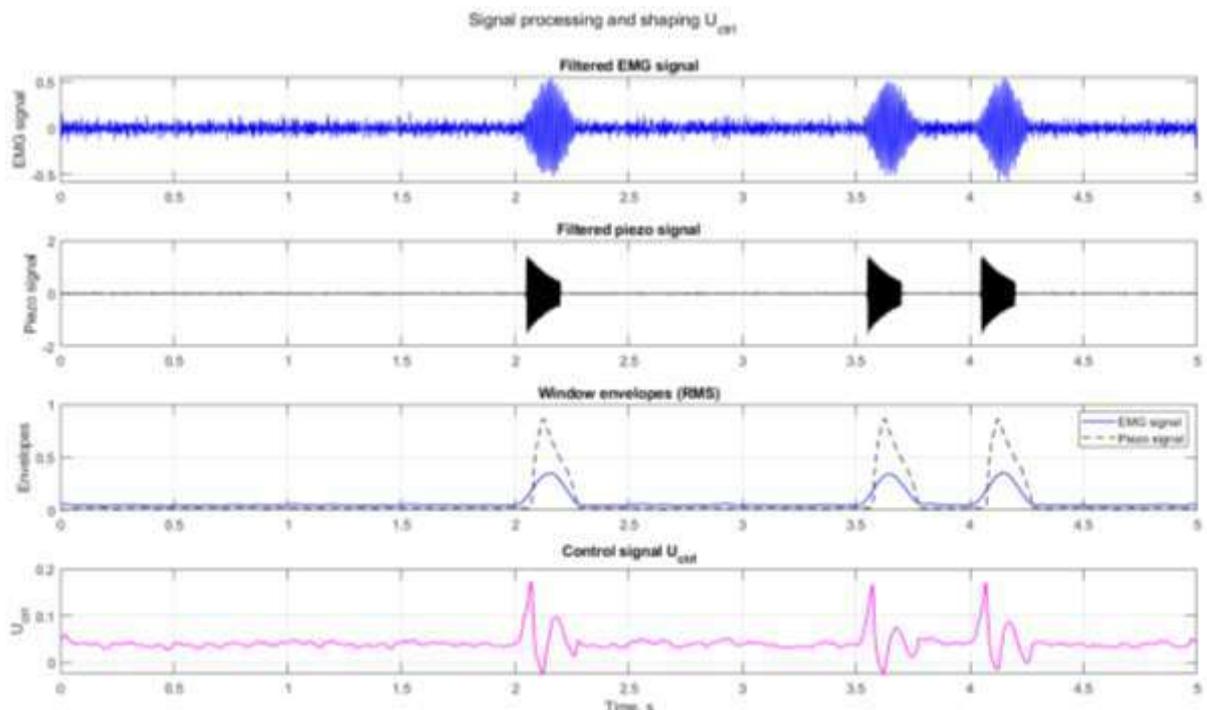


Figure 2 – Generated control signals of the bioprosthesis

The upper plots illustrate the filtered input EMG and piezoelectric signals, which have been segmented and smoothed in time windows. The lower plot shows the generated control signal  $U_{ctrl}$ , reflecting both the user's muscle activation and the corrective influence of the piezoelectric signal. A smooth variation of the control signal is observed, without abrupt jumps or oscillations, indicating the effectiveness of the proposed windowed processing.

Figure 3 shows the temporal variation of the main parameters of the prosthesis actuator (rotor angular velocity, armature current, and grip/contact force) under the influence of the generated control signal.

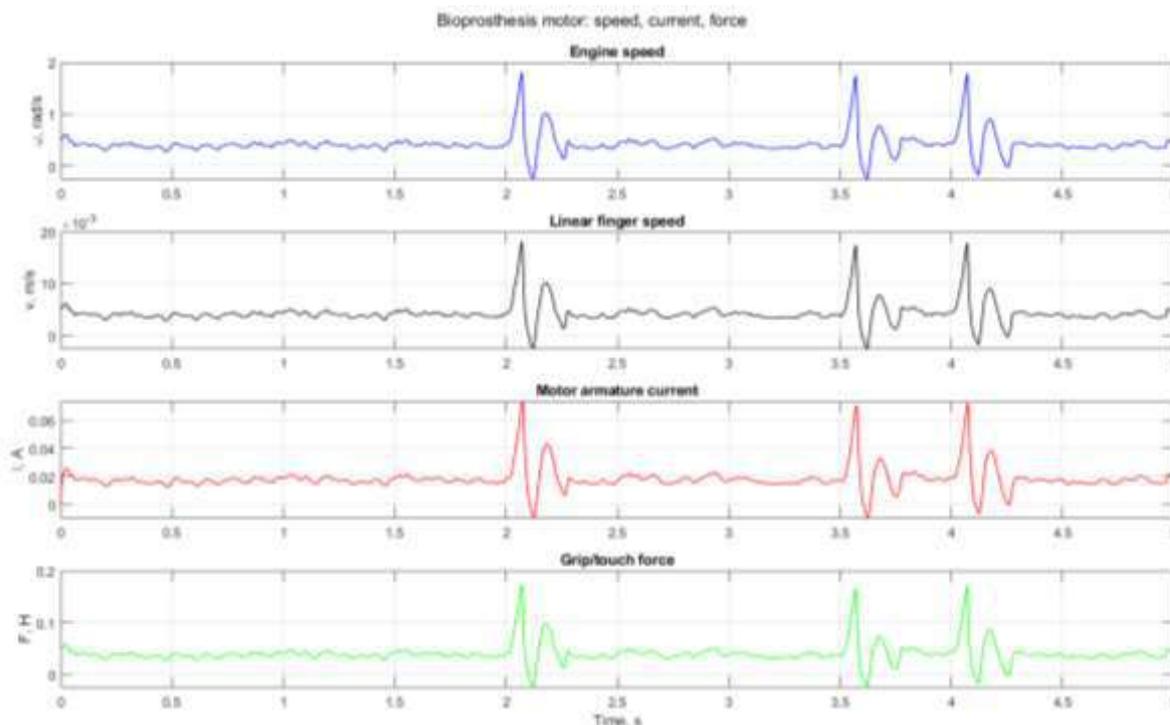


Figure 3 – Temporal variation of actuator parameters depending on the control signals

A typical inertial behavior is observed: rapid current fluctuations during transients subsequently transform into a smooth convergence of velocity and force to their steady-state values, indicating adequate interaction between the generated control signal and the actuator model. The presence of sensory correction via the control signal reduces overshoot and minimizes the steady-state force error, provided that the coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ , and the piezoelectric signal time delay are appropriately selected.

The plots demonstrate smooth actuator acceleration, absence of overshoot, and stabilization of the grip force upon reaching the target value. This confirms that using the EMG signal as the command channel and the piezoelectric signal as sensory feedback provides stable, accurate, and adaptive prosthesis control.

**Conclusions.** In this study, a method for windowed processing of EMG and piezoelectric signals was developed and investigated for generating control actions of upper-limb bioprostheses in real time. It was demonstrated that segmenting signals into short time windows with partial overlap ensures continuous information updating and minimal system reaction latency, while using the EMG signal as the command channel and the piezoelectric signal as the sensory feedback channel with a time delay allows reproduction of the natural sensorimotor loop 'intention – action – contact – correction.' The introduction of windowed smoothing and the Hilbert transform enhances the system's robustness against noise and accidental peaks, as well as ensures smooth and physiologically consistent control. Simulation results confirmed the effectiveness of the combined signal in providing precise control of the prosthesis actuator, taking into account its electromechanical dynamics. The findings indicate that the proposed approach offers advantages in stability, smoothness, and adaptability of control, and may serve as a basis for the development of next-generation bioprostheses. Future research directions include testing the method on real user biosignals, optimizing windowed processing parameters and sensory delay, and integrating machine learning algorithms to enhance adaptability and individualized control.

### References

1. Oskoei M. A., Hu H. Myoelectric control systems – A survey. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2007. Vol. 2, No. 4. P. 275-294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2007.07.009>.
2. Dozorskyi V., Martsenyuk V., Dozorska O., Dediv L., Klymuk N. The concept of developing the structure of a highly functional bionic hand prosthesis based on IoT technologies // *Proceedings of the 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT'2024)*. 2024. Vol. 3842. P. 268–280. CEUR Workshop Proceedings. ISSN 1613-0073.
3. Dozorskyi V., Dediv L., Kovalyk S., Dozorska O., Dediv I. Design of the endoskeleton of a biocontrolled hand prosthesis. *Scientific Journal of TNTU*. 2024. Vol 115. №3. P. 100-111.
4. Arora A. S., Joshi D. Development of threshold based EMG prosthetic hand. *Journal of Vibroengineering*. 2007. Vol. 9, No. 3. P. 11–14. URL: <https://www.jvejournal.com/article/1156>.
5. Ghildiyal S., Mani G., Nersisson R. Electromyography pattern-recognition based prosthetic limb control using various machine learning techniques. *Journal of Medical Engineering & Technology*. 2022. Vol. 46, No. 5. P. 392–402. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091902.2022.2062064>.
6. Edwards A. L., Dawson M. R., Hebert J. S., Sherstan C., Sutton R. S., Chan K. M., Pilarski P. M. Application of real-time machine learning to myoelectric prosthesis control: A case series in adaptive switching. *Prosthetics and Orthotics International*. 2016. Vol. 40, No. 5. P. 573-581. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309364615605373>.
7. Tchimini J., Dideriksen J. L., Dosen S. EMG feedback outperforms force feedback in the presence of prosthesis control disturbance // *Frontiers in Neuroscience*. 2022. Vol. 16. Art. 952288. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.952288>.

**Ковалик С. В., Хвостівський М. О.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

### МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ВІКОННОЇ ОБРОБКИ ЕМГ-СИГНАЛІВ ТА П'ЄЗОСИГНАЛІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КЕРУЮЧОЇ ДІЇ БІОПРОТЕЗІВ

У статті наведено метод віконної обробки біосигналів для формування керуючих дій у біопротезах верхніх кінцівок, що функціонують у режимі реального часу. Основу методу становить сегментація ЕМГ-сигналів та п'єзосигналів у коротких часових вікнах тривалістю 40–80 мс з частковим перекриттям, що забезпечує безперервне оновлення інформації та мінімальну затримку реакції системи (<50 мс). ЕМГ-сигнал використовується як основний канал наміру користувача, а п'єзосигнал – як канал сенсорного зворотного зв'язку. Для кожного вікна виконується фільтрація шумів, розрахунок середньоквадратичних значень та огинаючих за допомогою Гільберт-перетворення, а також згладжування результатів експоненційним фільтром. П'єзосигнал вводиться у систему з часовою затримкою 30-70 мс, що відтворює природну сенсомоторну петлю «намір – дія – контакт – корекція». На основі згладжених ЕМГ-сигналів та затриманих п'єзосигналів формується керуючий сигнал, який подається на виконавчий двигун, враховуючи його електричну та механічну динаміку. Запропонований метод поєднує віконну обробку та сенсорну затримку у єдиному алгоритмі, що підвищує стабільність, плавність та фізіологічну відповідність керування, пригнічує випадкові піки та забезпечує адаптацію до змінних умов. Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу для точного й надійного керування біопротезами нового покоління.

**Ключові слова:** ЕМГ-сигнал, п'єзосигнал, біопротез, двигун, віконна обробка, сенсорний зворотний зв'язок, реальний час, Гільберт-перетворення, керуючий сигнал, стабільність керування, адаптивні системи, Matlab.

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
12.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

UDC 620.17:678.686:004.9:621.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-2

Stukhliak P., Totosko O., Stukhliak D., Zoloty R., Gypka A., Didunik O.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## DEVICE FOR AUTOMATED TESTING OF EPOXY COMPOSITE COATINGS FOR THE STRENGTH OF ADHESIVE BONDS

*Modern industry in Ukraine involves complex extreme operating conditions for various mechanisms and machines in the open air, including cyclical temperature changes. In this area of research, the creation of effective protection systems is perspective. From a scientific point of view, the use of adhesive-strength coatings made of various materials depending on their functional purpose is interesting in this area of research, which determines the use of different methods for their formation. The most technologically advanced in terms of forming protective coatings from these materials, operation and restoration are epoxy composites with a wide range of functional characteristics. One of the main characteristics mentioned is the strength of the adhesive bonds of such coatings to the working surfaces of parts. The strength of adhesive joints is determined by the amount of separation of cylindrical metal samples glued together. The accuracy of determining these characteristics depends significantly on the accuracy of the direction of force application relative to the adhesive joint. This indicator is influenced by the total error in the technological chain, in the system: "fixed gripper on a tensile testing machine (fastening error) - the shank of one of the cylindrical samples on the side of the fixed gripper of the tensile testing machine (manufacturing error of the shank relative to the axis of the cylindrical sample) - cylindrical sample on the side of the movable gripper (error of mutual positioning of two cylindrical samples in the adhesive joint area, error of manufacturing the shank of the specified cylindrical sample and error of its fastening on the movable gripper). The development of a device that will reduce the total error in the aforementioned system will increase the accuracy of determining the adhesive characteristics of coatings, including when testing multilayer coatings on metal surfaces.*

**Keywords:** *multilayer coatings, epoxy composites, shank fastening error, mutual positioning accuracy of samples, adhesion characteristics.*

**Introduction.** Current industrial development determines the problem of designing various mechanisms and machines with increased reliability and durability under various operating conditions without a significant increase in the amount of materials used in their manufacture and repair [1-4]. Improvements in performance are mainly achieved by applying protective coatings made of composite materials with different functional purposes [5-7]. Various methods are used to form these coatings [8-11]. Epoxy composite materials and coatings based on them with controlled structural organisation have also proven themselves well in solving this problem while simultaneously expanding the functional characteristics of various products that operate, in most cases, in extreme conditions [12-14]. An example is the operation of parabolic antennas in different climatic zones, namely in marine climates, at temperatures where frost occurs, various atmospheric precipitation, etc. When the product is in 'sleep' mode and not in operation, frost, ice, and snow accumulate on the surface of the antenna. These factors increase the time required to prepare the product for operation of the parabolic antenna. The problems highlighted necessitate the creation of a heating system for the working surface of the product. In this case, the most effective solution is to use surface-distributed resistive electric heaters. When designing such products, multi-layer coatings with different functions are used: electrical insulation, electric heating, and thermophysical. The most technologically feasible way is to place such coatings on the back side of the antenna. A coating layer is used when spraying aluminium oxide and forming subsequent epoxy composite layers [15-16]. Reliable operation of the heating system is ensured by adhesive-mechanical interaction in the composite material of the layers both at the phase boundary in the 'matrix-filler' system and between the layers and in the 'aluminium base-multilayer coating' systems.

In view of the above, research aimed at creating an adhesion-strength gradient coating consisting of layers of sprayed aluminium oxide and subsequent layers of epoxy composites is scientifically and technically important when creating an antenna heating system [17-18]. To solve this problem, it is necessary to study the effect of their structural parameters, including nanostructural formations, on their adhesion characteristics.

**The aim of the work.** The aim of the work is to develop a device to ensure the accuracy of mutual positioning of cylindrical samples glued together by self-centring during the process of testing the strength of adhesive joints.

**Research materials and methods.** The samples are made of steel (Figs. 8-9). The strength of adhesive bonds to this material is known and, under this test scheme, is  $\sigma = 55-60$  MPa for epoxy binders (ED-20, CYD128, E-51). The strength of adhesive bonds when using a binder based on E-7 epoxy resin manufactured in China is 74-78 MPa.

The insert made of different materials (steel, titanium, aluminium) is coated with a coating of different materials (ceramics, cermets) with a thickness of 200-250  $\mu\text{m}$  by gas flame spraying. When using the method of detonation spraying on a steel insert (Steel 45), the theoretical strength of the adhesive joints can be less than or equal to  $\sigma$  for ED-20, CYD128, E-51 - 55-60 MPa, for E-7 - 74-78 MPa.

Destruction happened at the junction of the system insert - detonation coating for detonation spraying. Thus, this approach to testing the strength of adhesive bonds will allow determining the adhesive characteristics of different materials coated by different methods. Since the tensile adhesion tests are performed in an automated mode using a tensile tester and a computer that records not only the adhesion characteristics but also the elastic modulus and the amount of coating deformation, it is necessary to ensure that the load and the direction of movement of the grippers are aligned. For this purpose, we propose a device design that will provide these indicators with the smallest error.

**Discussion of research results.** The device belongs to the technical field of devices and instruments for improving the accuracy of determining the adhesive characteristics of epoxy composite coatings [19-20]. The design of the device is based on the task of self-centring to reduce the total error accumulated in the technological chain in the system 'sample - device - tensile tester'. This total error has the following components:

- manufacturing errors, installation in one of the cylindrical parts of the sample when the shank is fixed in the fixed gripper of the tensile machine;
- manufacturing error in the installation and fixing of the shank of another cylindrical sample on the side of the moving gripper of the tensile machine.

The development of a device that will reduce the total error in this system will improve the accuracy of determining the adhesive characteristics of coatings to metal surfaces, including when testing multilayer epoxy composite coatings using a tensile tester with the results and test process recorded on a computer.

The sample is made in the form of two cylinders of specimens glued together. An epoxy composite material is placed at this joint to test the strength of the adhesive bond. The device (Fig. 1-9) is equipped with hinged fixing axes, with their horizontal longitudinal optical axes perpendicular to each other in the projection onto the horizontal plane, and two grippers between the tensile machine holders. A sample consisting of two cylinders glued together by a butt is equipped with two cylindrical axes, and the first gripper has a flat protrusion placed between the jaws of the tear opener holder, and on the opposite side of the first gripper there is a groove perpendicular to the larger side of the flat protrusion with a flat protrusion of the next second gripper placed therein, which is fixed relative to the first gripper by a cylindrical axis. It should be noted that the second gripper has a groove perpendicular to the flat protrusion in the vertical plane on the side opposite to the protrusion, with a flat protrusion of the test specimen placed therein and fixed therein by a cylindrical axis. The holes for the fixing axes of the first and second grippers are perpendicular to each other, and the groove of the second gripper has a protrusion of the test specimen, which is fixed relative to the second gripper. axis. The holes in the projection of the second gripper and the projection of the test sample are made with a diameter larger than the diameter of the fixing axes by an amount equal to the amount of the gap between the end surface of the projection of the second gripper and the bottom surface of the recess of the first gripper. Accordingly, the end surface of the protrusion of the test specimen shank and the bottom surface of the recess of the second gripper can be fixed with the axis of the second gripper with the protrusion of the specimen. The dimensions of the groove of the first and second grippers are larger than the width of the projections of the second gripper and the projection of the test piece placed in the groove of the second gripper, with the possibility of rotational movement along the fixing axes of the first and second grippers. It is possible to move the second gripper along the fixing axis of the first gripper and the test sample along the fixing axis of the second gripper, and the holes in the body of the first and second grippers are made with a diameter equal to the diameter of the axes.

The technical concept of the device is presented in the kinematic diagram in Fig. 1 and the structural diagrams in Figs. 2-7. The device consists of a first gripper 1 with a flat protrusion 2 for placement in the holder of the breaking machine. On the opposite side, there is a groove 3 located parallel to the larger side of the flat protrusion 2. The second gripper 4 is located in the groove 3 of the first gripper 1 with protrusion 5. The first gripper 1 and the second gripper 4 are fixed to each other by axis 6 through holes 7 and 8. In the second gripper 4, on the side opposite the protrusion 5, there is a groove 9 located perpendicular to the flat protrusion 5.

A test sample 10 is placed in groove 9 with a flat protrusion 11 and fixed with a cylindrical axle 12, which is placed in the hole 13 of the protrusion 11 of the test sample 10 and the hole 14 of the second gripper 4. The holes 7 and 8 for the fixing axes 6 and 12 in the flat projections 5 and 11 of the second gripper 4 and the test sample 10 are made with a larger diameter by the amount of the gap  $h$ . The longitudinal optical axes of holes 7 and 14 for fixing pins 6 and 12 of the first 1 and second grippers are perpendicular to each other. The test sample 10 with a projection 11 is placed in the groove 9 of the second gripper 4 and fixed relative to the second gripper 4 by the fixing axis 12. The gaps between the end surface 15 of the protrusion 5 of the gripper 4 and the surface 16 of the bottom of the groove 3 of the gripper 1 and, respectively, the surface 17 of the protrusion 11 of the test sample 10 are made equal to the gap  $h$ . A hole 13 is made in the projection 11 of the test sample 10. On the opposite side of the projection 11 of the test sample 10, there is a projection 18 that can be placed in the holder of a tensile testing machine during testing. The test sample consists of two parts (Fig. 5). An adhesive is placed between them. It is not shown in the structural diagram, as it is not a structural element.

It should be noted that a gap  $h$  is provided between the inner side surfaces 19 of the groove 3 of the gripper 1 and the side surfaces 20 of the gripper 4 of the protrusion 5. Also, a gap  $h$  is provided between the inner side surfaces 21 of the groove 9 of the second gripper 4 and the side surfaces 22 of the protrusion 11 of the test specimen 10. The gap provides for the possibility of rotational and axial movement along the axes 6 and 12 of the second gripper 4 and the test specimen 10. The openings 7 and 14 in the gripper bodies 1 and 4 are made equal to the diameter of the axes 6 and 12. It should be noted that the surfaces of the axes 6 and 12 and the holes 8 and 13 are made with a roughness  $Ra = 0.16 \mu\text{m}$  and heat-treated to 45-50 HRC. Before a series of tests, it is necessary to apply lubricant to the surface of the fixing axes 6 and 12 to improve the mutual movement of the mated parts during the process of self-centring during testing. The value of the gap  $h$  was selected for design reasons and is 4-5 mm. This gap  $h$  ensures the self-centring of the test specimen 10. It should be noted that the fixture assembly ensures that the guaranteed gap  $h$  is maintained between the surfaces 22 and 23 of the grippers 1 and 4, the surfaces 24 and 25 of the gripper 4 and the test sample 10.

The proposed device is implemented as follows. The device is assembled in several consecutive stages. The flat protrusion 5 of the gripper 4 is placed in the groove 3 of the first gripper 1. Next, the hole 8 of the gripper 4 is aligned with the holes 7 in the body of the gripper 1 and fixed with the fixing axis 6. In this case, due to the gaps  $h$  between the corresponding surfaces (described above), the second gripper 4 can move along the fixing axis 6 and rotate around the optical axis of the fixing axis 6. Next, a flat protrusion 11 of the test sample 10 is placed in the groove 9 of the second gripper 4, aligning the hole 13 with the holes 14 in the gripper body 4 with the fixing axis 12. The specified test sample 10 can be displaced along the fixing axis 12 and rotated around the optical axis of the fixing axis 12. The device is ready to be placed in the holders of the tensile testing machine.

The device assembly (Figs. 1, 2, 7) is placed vertically between the jaws of the upper holder of the tear opener with the flat protrusion 2 of the gripper 1. This holder is capable of vertical movement at a given speed. A schematic diagram of the joint formation for testing the strength of adhesive joints is shown in Fig. 8-9.

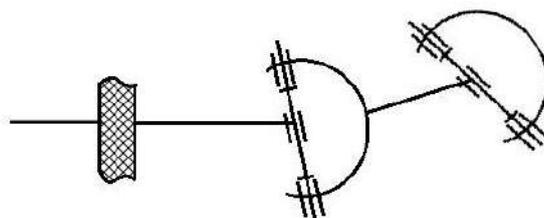


Figure 1 – Kinematic scheme of the device

The test material insert is coated, for example, by detonation spraying. Next, an epoxy coating is formed. The material is vacuumed before forming the joint. Next, the joint is formed under load for 24 hours, heat-treated if necessary, followed by testing. Next, the test specimen 10 is placed between the jaws of the lower fixed holder of the tensile machine by the projection 18. Next, switch on the tensile testing machine. The test is started. The results of movement at the required speed and force are set on a computer using the developed program. Next, the test results are analysed.

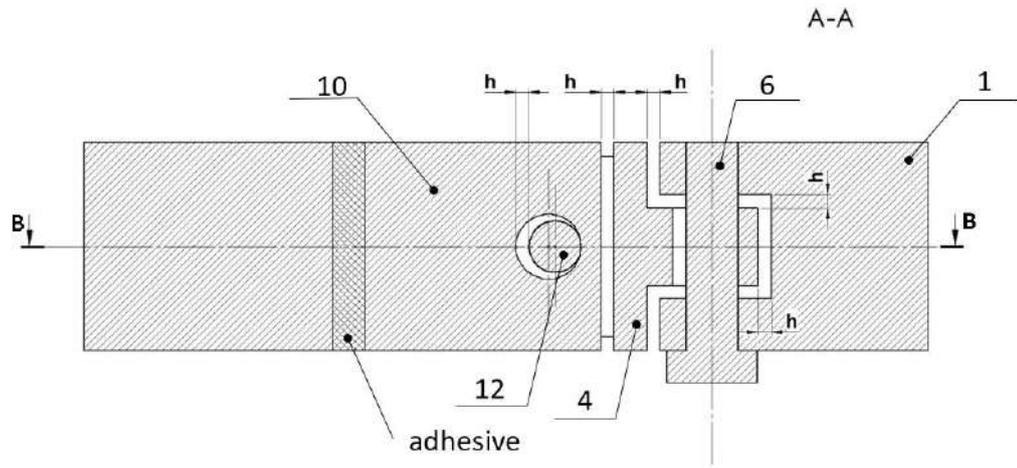


Figure 2 – General view of the device with longitudinal section A-A for a better view of the design.

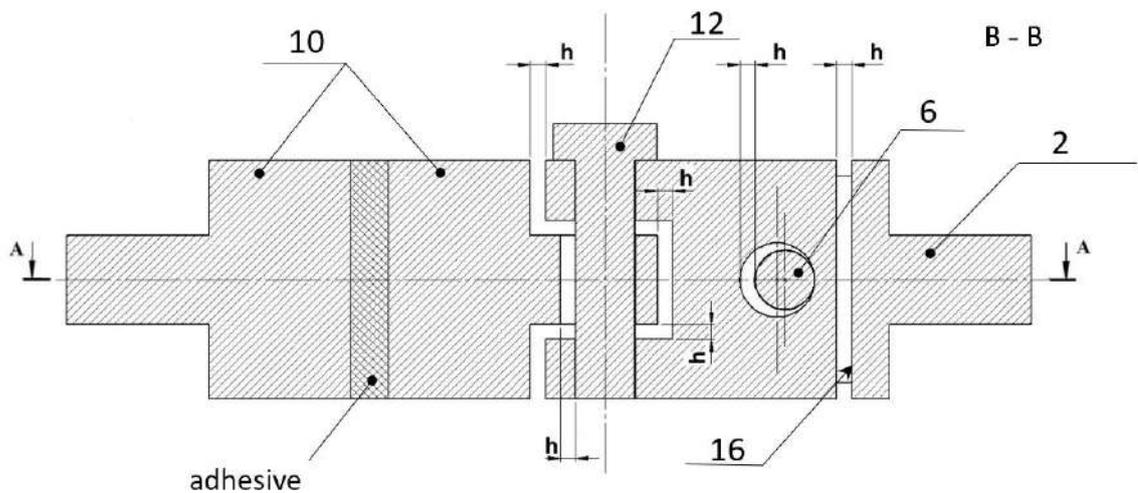


Figure 3 – General view of the device with longitudinal section B-B for a better view of the structure.

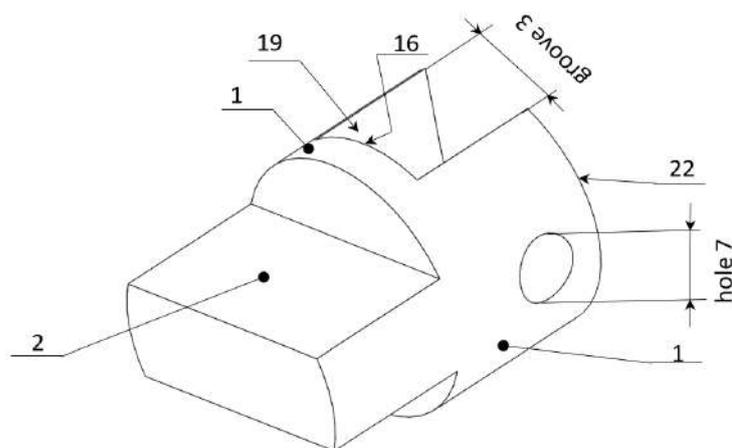


Figure 4 – The first gripper in axonometry.

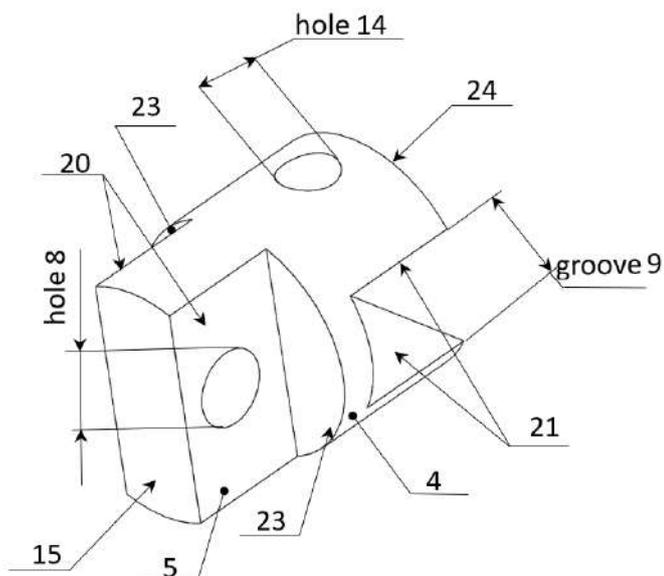


Figure 5 – The second gripper in axonometry.

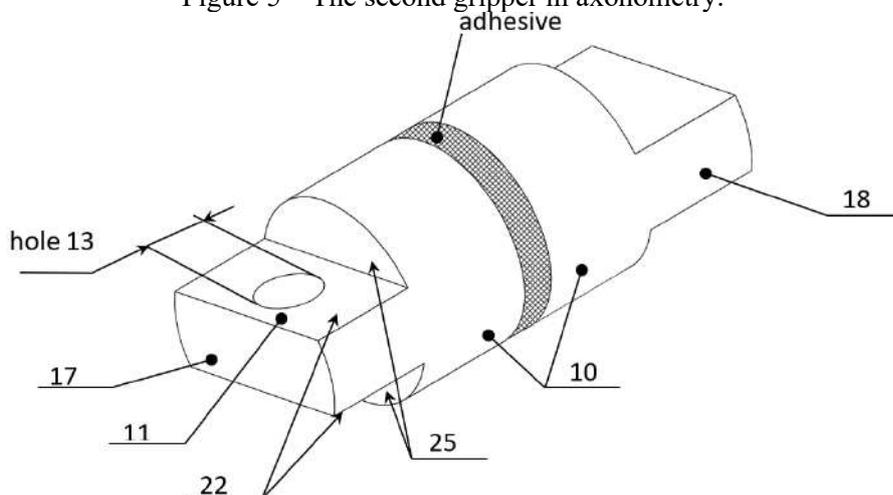


Figure 6 – Sample for testing the strength of adhesive joints in axonometry for a better view of its design with an image of an adhesive bond.

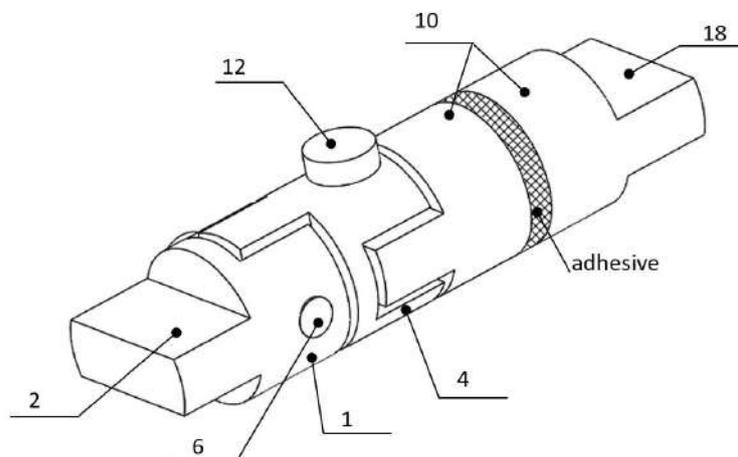


Figure 7 – General view of the device assembly (axonometry).

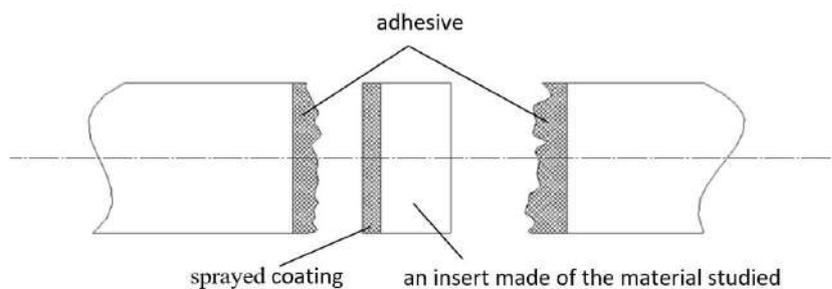


Figure 8 – Scheme of adhesive joint formation.

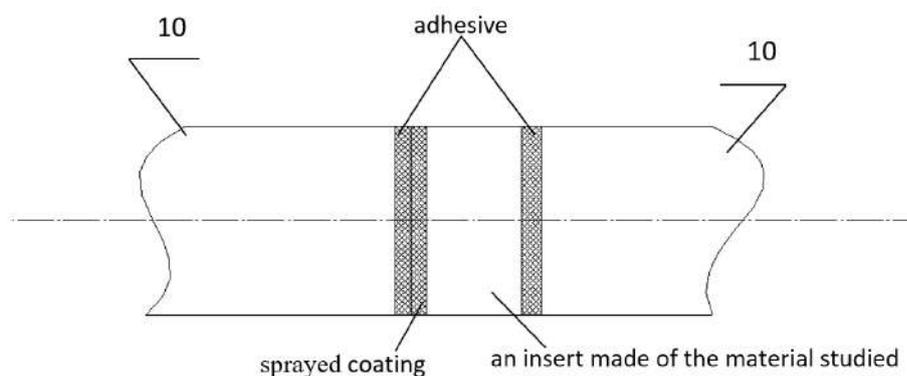


Figure 9 – General view of the joint.

**Conclusions.** The use of the proposed device will ensure increased testing accuracy by applying a load force along the vertical axis (longitudinal axis) of the device. The use of the proposed device will allow to load the adhesive layer in the test samples evenly. Conditions are provided for adhesive failure of the joint without chipping and its distortion relative to the direction of the applied force. Tangential loads during adhesive joint failure are significantly minimized. This increases the accuracy of adhesive bond strength testing. When installing a test specimen with an adhesive joint, the positioning accuracy is improved while reducing the time required to install the specimen in the working parts of the tensile testing machine. The testing process is simplified and the accuracy of determining the strength of adhesive joints to different materials is increased. A reduction in the error of experimental studies was observed when testing polymer materials based on reactoplasts. In subsequent studies, it is planned to develop similar devices for testing multilayer coatings on various materials.

### References

1. Morse, L., Mallardo, V., Aliabadi, F. M. H. Manufacturing cost and reliability-based shape optimization of plate structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2022. Vol. 123, No. 10. DOI: [10.1002/nme.6931](https://doi.org/10.1002/nme.6931).
2. Zhan, J., Zhu, X., Zhu, B. et al. Fatigue reliability-based topology optimization of compliant mechanisms considering material uncertainties // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2025. Vol. 68. Article 95. DOI: [10.1007/s00158-025-04006-x](https://doi.org/10.1007/s00158-025-04006-x).
3. Новицький А. В. Методичні підходи до формування програми забезпечення надійності сільськогосподарської техніки / А. В. Новицький // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч. 1. С. 134-143.
4. Zhao, L., Tang, X., Li, M. Reliability analysis and optimization method of a mechanical system // *Machines*. 2023. Vol. 12, No. 12. - Article 465. DOI: [10.3390/machines1212465](https://doi.org/10.3390/machines1212465).
5. Korzhyk, V., Kopei, V., Stukhliak, P. et al. Features of the Structure of Layered Epoxy Composite Coatings Formed on a Metal-Ceramic-Coated Aluminum Base // *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 15. Article 3620. DOI: [10.3390/ma18153620](https://doi.org/10.3390/ma18153620).
6. Stukhlyak, D. P., Yakushchenko, S. V. Influence of nanoparticles on the physical and mechanical properties of modified epoxy-composite coatings // *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, No. 1. С. 14-21.

7. Букетов А. В., Долгов Н. А., Сапронов А. А. та ін. Механічні характеристики епоксидних нанокompозитних покриттів з частинками ультрадисперсного алмазу // Проблеми міцності. 2017. № 3 (447). С. 149-157.
8. Korzhyk, V., Burlachenko, O., Strohonov, D. et al. Effect of the technological parameters of plasma-arc spraying of flux-cored wire on the structure and properties of intermetallic coatings based on Fe<sub>3</sub>Al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 1, No. 12(121). P. 6-15. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.274062.
9. Korzhyk, V., Berdnikova, O. M., Stukhliak, P. et al. Strength and crack resistance structural criteria of composite coatings produced by the method of multi-chamber detonation spraying // Solid State Phenomena. 2024. Vol. 355. P. 123-129. DOI: 10.4028/p-qjM7yA.
10. Butt, M. A. et al. Thin-film coating methods: a successful marriage of high-performance and cost-effectiveness // Coatings. 2022. Vol. 12, No. 8. Article 1115. DOI: 10.3390/coatings12081115.
11. Fotovvati, B. et al. On coating techniques for surface protection: a review // Manufacturing Review. 2019. Vol. 3, No. 1. Article 28. DOI: 10.1186/s40487-019-0090-x.
12. Стухляк Д. П. Вплив модифікатора 2,4-діамінотолуену на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних полімерних покриттів // Наукові нотатки. 2018. Вип. 63. С. 203-208.
13. Buketov, A. V., Dolgov, N. A., Sapronov, A. A., Nigalatii, V. D. Adhesive pull and shear strength of epoxy nanocomposite coatings filled with ultradispersed diamond // Strength of Materials. 2018. Vol. 50, No. 3. P. 425-431. DOI: 10.1007/s11223-018-9986-5.
14. Sapronov, O., Buketov, A., Kim, B. et al. Increasing the service life of marine transport using heat-resistant polymer nanocomposites // Materials. 2024. Vol. 17, No. 7. Article 1503. DOI: 10.3390/ma17071503.
15. Xu, Z., Zhang, C., Li, Y. et al. Effect of the alumina micro-particle sizes on the thermal conductivity and dynamic mechanical properties of epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites // PLOS ONE. 2023. Vol. 18. – Article e0284031. DOI: 10.1371/journal.pone.0284031.
16. Ata, S. et al. Effect of the alumina particle filler structure and particle size on the performance of cyclo-olefin polymer/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites // ACS Omega. 2023. Vol. 8, No. 35. P. 33317-33328. DOI: 10.1021/acsomega.2c08011.
17. Preparation of anticorrosive epoxy nanocomposite coating modified by polyethyleneimine nano alumina / Liang, X., Hua, C., Zhang, M. et al. // Coatings. 2023. Vol. 13, No. 3. Article 561. DOI: 10.3390/coatings1303056.
18. Combining alumina particles with three dimensional networked graphene for high thermal conductivity epoxy composites / Wang, H. et al. // ACS Applied Polymer Materials. 2020. DOI: 10.1021/acsapm.0c01055.
19. Кліщовий захоплювач: деклараційний патент на корисну модель № UA 26697 U / Мелашенко Володимир Антонович, Александрова Тетяна Володимирівна; Криворізький технічний університет. № заявки: u200703511; заявл. 28.04.2007; опубл. 10.10.2007. Бюл. № 17.
20. Установка для випробування покриття на розтягнення та машина для випробування на розтягнення: патент КНР ZL 2024 1 1922932.1 / Стухляк Петро, Коржик Володимир, Ду Хан та ін. Заявл. 25.12.2024; видано: CN 119757187 B.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
24.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
15.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

UDC 004.272:004.75:004.382.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-3

**Totosko O., Stukhliak D., Stukhliak P., Verbytskyy O.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## HARDWARE–SOFTWARE PLATFORM ARCHITECTURE FOR CLOUD COMPUTING ACCELERATION USING FPGA

*The increasing computational load in cloud infrastructures driven by large-scale data analytics and machine-learning tasks requires efficient hardware acceleration solutions. This paper presents a hybrid hardware–software architecture integrating FPGA-based accelerators into a cloud platform for data-intensive and inference-driven applications. The proposed approach combines reconfigurable hardware logic with containerized software environments, achieving 3–5× improvement in performance and up to a 40% reduction in energy consumption compared to CPU-based systems. Experimental evaluation shows that the FPGA-enabled architecture provides scalable, low-latency execution suitable for high-throughput workloads in modern data centers.*

**Keywords:** FPGA, cloud computing, hardware acceleration, reconfigurable computing, hardware–software co-design, machine learning.

**Problem statement.** Cloud computing has become the de facto paradigm for elastic and cost-effective data processing. However, emerging workloads—deep neural network inference, stream analytics, and high-throughput cryptography—exhibit limited scalability on conventional CPU architectures [1-3]. Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) offer massive fine-grained parallelism and reconfigurability, enabling domain-specific pipelines with high energy efficiency. Major cloud vendors already expose FPGA instances; yet, the seamless integration of FPGA accelerators into a generic, containerized cloud stack remains non-trivial due to orchestration, virtualization, and security overheads.

This paper proposes a comprehensive hardware–software platform architecture for integrating FPGA accelerators into Kubernetes-based clouds. We address bitstream management, runtime scheduling, and RDMA-backed data movement to close the gap between application containers and reconfigurable logic. We provide an experimental evaluation over matrix multiplication, CNN inference (ResNet-50, batch=16), and AES-256 encryption showing 3–5× speed-ups and 35–45% power savings [4].

**Related Work.** Research on cloud-scale hardware acceleration has progressed along three axes: (i) FPGA virtualization fabrics enabling partial reconfiguration and multi-tenant sharing; (ii) heterogeneous platforms coupling CPUs, GPUs, and FPGAs under a unified runtime; (iii) higher-level programming models (OpenCL/HLS/Vitis) reducing development effort while preserving performance portability. Microsoft Catapult and AWS F1 demonstrate production viability, while academic work explores dynamic partial reconfiguration and runtime schedulers that minimize latency spikes. Despite these advances, challenges persist in standardizing APIs for container orchestration and ensuring strong isolation for security-sensitive workloads [5].

**Hardware–Software Co-Design.** The platform follows a co-design approach in which hardware kernels and software services are co-optimized. A control plane manages bitstreams, admission control, and QoS policies; a data plane enables high-throughput communication over PCIe Gen4 with optional RDMA; monitoring hooks export telemetry (power, temperature, and utilization) to a Prometheus/Grafana stack for closed-loop control. Scheduling uses a weighted round-robin policy parameterized by task priority, latency estimate, and transfer cost [6].

Scheduling score formula:  $S_i = W_i / (L_i + T_i)$ , where  $W_i$  is priority,  $L_i$  is expected latency, and  $T_i$  is transferring overhead [7].

**Proposed Architecture.** The architecture comprises three layers. The virtualization layer manages a pool of pre-compiled bitstreams mapped to kernels (matrix multiplication, AES, CNN inference). The communication layer employs RDMA to bypass the host CPU during memory transfers, reducing overhead. The management layer exposes REST/gRPC APIs for container-to-accelerator binding, with admission control based on resource availability and QoS. Partial reconfiguration multiplexes up to four kernels per FPGA while maintaining utilization under 80% [8].

**Methodology and Experimental Setup.** We evaluate a hybrid cluster comprising CPU-only and FPGA-accelerated nodes under identical data and software conditions [9].

Table 1 – Experimental environment (CPU vs FPGA nodes).

Parameter	CPU Node	FPGA Node
Processor	Intel Xeon Silver 4214 (12 cores, 2.2 GHz)	Xilinx Alveo U250
Memory	128 GB DDR4	64 GB HBM2
Interconnect	10 GbE + PCIe Gen4 ×16	10 GbE + PCIe Gen4 ×16
OS	Ubuntu 20.04 LTS	Ubuntu 20.04 + XRT
Software	Docker, Kubernetes, TensorFlow 2.12	Vitis 2023.1, Vivado 2023.1

Workloads include dense 1024×1024 matrix multiplication, ResNet-50 inference (batch=16), and AES-256 encryption. Metrics: throughput (GOPS), latency (ms), power (W), efficiency (GOPS/W) [10]. Results and Performance Evaluation.

Table 2 – Performance comparison (GOPS) and speed-up.

Task	CPU (GOPS)	FPGA (GOPS)	Speed-up (×)
Matrix Multiply	280	910	3.25
CNN Inference	150	610	4.07
AES Encryption	200	990	4.95

As shown in Fig. 1, FPGA-accelerated configurations outperform CPU baselines across all workloads; the aggregate speed-up is summarized in Fig. 2. [11]. Energy-related metrics are depicted in Fig. 3 and Fig. 4, illustrating lower power draw and higher GOPS/W for FPGA nodes versus CPU nodes [12]. Resource saturation for the bitstream used in our experiments is reported in Fig. 5 [13]. Quantitative comparisons are reported in Table 2 (throughput and speed-up) and Table 3 (power and efficiency gains) [14].

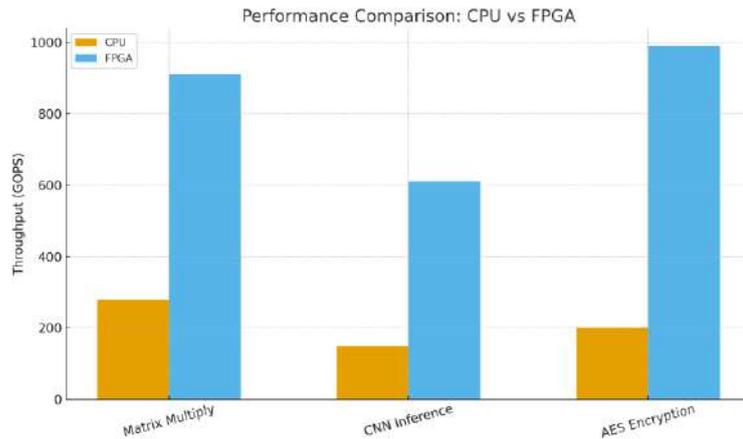


Figure 1 – Performance comparison: CPU vs FPGA (higher is better).

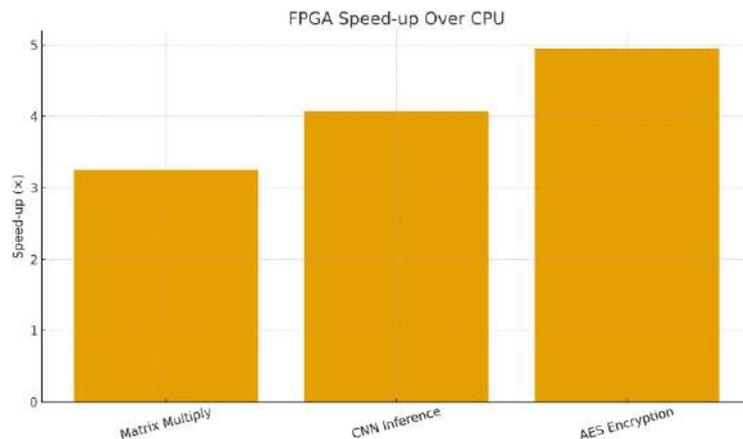


Figure 2 – Speed-up of FPGA over CPU across workloads.

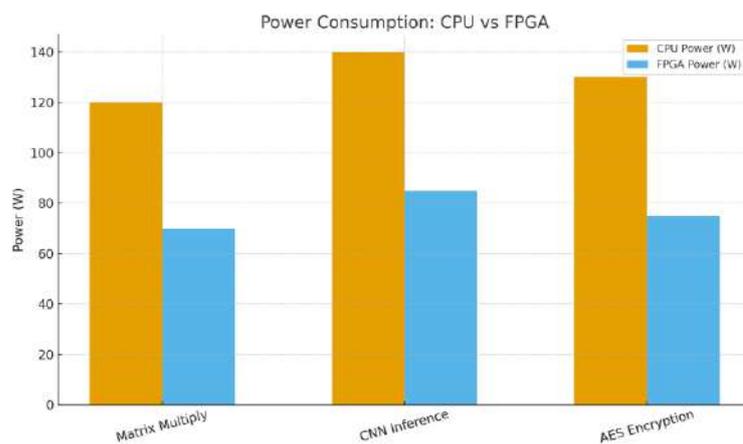


Figure 3 – Power consumption under representative workloads.

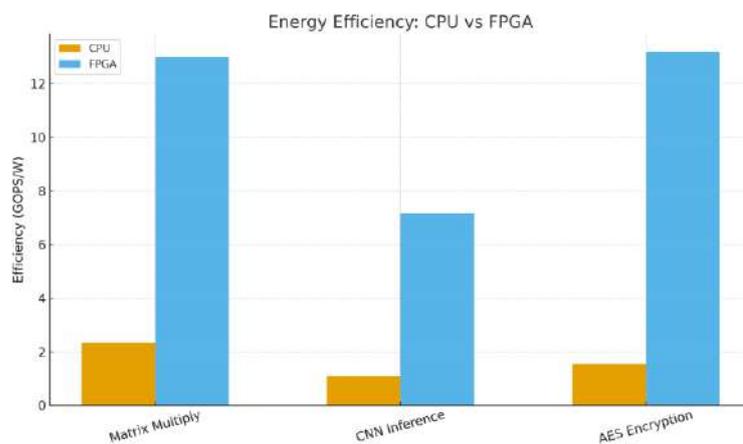


Figure 4 – Energy efficiency (GOPS/W) for CPU and FPGA.

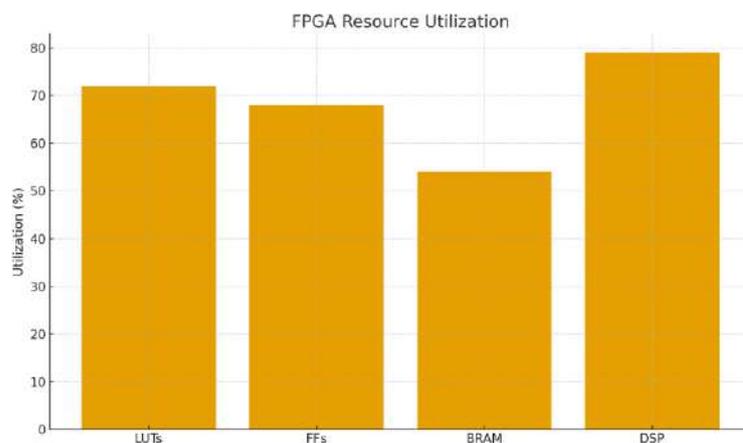


Figure 5 – FPGA resource utilization for the proposed design.

Table 3 – Power and energy efficiency.

Task	CPU Power (W)	FPGA Power (W)	Efficiency Gain (GOPS/W)
Matrix Multiply	120	70	5.57×
CNN Inference	140	85	6.70×
AES Encryption	130	75	8.58×

**Discussion.** Results confirm that FPGA acceleration significantly improves throughput and energy efficiency versus CPU-only baselines, with the largest gains observed in highly parallelizable kernels (encryption) and pipeline-friendly workloads (matrix multiplication). RDMA-based data movement eliminates host CPU overhead during transfers, contributing to latency reductions. Remaining challenges include long compile times for bitstreams and multi-tenant security isolation. Adopting standardized APIs for orchestration (e.g., Kubernetes device plugins) and trusted partial reconfiguration can mitigate these issues [15].

**Conclusion and Future Work.** We presented a hardware–software platform architecture for integrating FPGA accelerators into containerized cloud systems. Our evaluation over representative workloads demonstrates 3–5× performance improvement and up to 40% energy savings. Future work involves AI-driven scheduling, fine-grained QoS across multi-FPGA clusters, and in-line security monitoring IPs to strengthen tenant isolation [16].

### References

1. Yue, Zha, and Jing Li. Virtualizing FPGAs in the Cloud // Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS '20). – New York : ACM, 2020. P. 845-858. DOI: 10.1145/3373376.3378491.
2. Guo, J., Zhang, L., Romero Hung, J. et al. FPGA sharing in the cloud: a comprehensive analysis // Frontiers of Computer Science. 2023. Vol. 17. Article 175106. DOI: 10.1007/s11704-022-2127-0.
3. Al-Aghbari, A., Elrabaa, M. E. S. A platform for FPGA virtualization in clouds and data centers // Microprocessors and Microsystems. 2018. Vol. 62. P. 61-71. ISSN 0141-9331. DOI: 10.1016/j.micpro.2018.07.010.
4. Skhiri, R., Fresse, V., Jamont, J. P. et al. From FPGA to Support Cloud to Cloud of FPGA: State of the Art // International Journal of Reconfigurable Computing. 2019. Article ID 8085461. 17 p. DOI: 10.1155/2019/8085461.
5. Landgraf, J., Yang, T., Lin, W. et al. Compiler-driven FPGA virtualization with SYNERGY // Proceedings of the 26th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS '21). New York : ACM, 2021. P. 818–831. DOI: 10.1145/3445814.3446755.
6. Guo, Y., Guo, Z., Song, X., Song, M. QGWFQS: A Queue-Group-Based Weight Fair Queueing Scheduler on FPGA // Micromachines (Basel). 2023. Vol. 14, No. 11. Article 2100. DOI: 10.3390/mi14112100.
7. Fusco, A., Hassan, S., Mack, J., Akoglu, A. A Hardware-based HEFT Scheduler Implementation for Dynamic Workloads on Heterogeneous SoCs // 2022 IFIP/IEEE 30th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC). Patras, Greece, 2022. P. 1-6. DOI: 10.1109/VLSI-SoC54400.2022.9939623.
8. Damiani, A., Fisaletti, G., Bacis, M. et al. BlastFunction: A Full-stack Framework Bringing FPGA Hardware Acceleration to Cloud-native Applications // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2022. Vol. 15, No. 2. Article 17. 27 p. DOI: 10.1145/3472958.
9. Osana, Y., Sakamoto, Y. Performance Evaluation of a CPU-FPGA Hybrid Cluster Platform Prototype // Proceedings of the 8th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART '17). New York : ACM, 2017. Article 22. P. 1-6. DOI: 10.1145/3120895.3120917.
10. Hall, M., Betz, V. HPIPE: Heterogeneous Layer-Pipelined and Sparse-Aware CNN Inference for FPGAs // Proceedings of the 2020 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA '20). New York : ACM, 2020. P. 320. DOI: 10.1145/3373087.3375380.
11. Latif, K., Aziz, A., Mahboob, A. Efficient resource utilization of FPGAs // Proceedings of the 7th International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT '09). New York : ACM, 2009. Article 26. P. 1-5. DOI: 10.1145/1838002.1838031.
12. Arucu, M., Iliev, T. Performance Evaluation of FPGA, GPU, and CPU in FIR Filter Implementation for Semiconductor-Based Systems // Journal of Low Power Electronics and Applications. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 40. DOI: 10.3390/jlpea15030040.
13. Meyer, M., Kenter, T., Plessl, C. Multi-FPGA Designs and Scaling of HPC Challenge Benchmarks via MPI and Circuit-switched Inter-FPGA Networks // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2023. Vol. 16, No. 2. Article 24. 27 p. DOI: 10.1145/3576200.
14. Fowers, J., Brown, G., Cooke, P., Stitt, G. A performance and energy comparison of FPGAs, GPUs, and multicores for sliding-window applications // Proceedings of the ACM/SIGDA International

Symposium on Field Programmable Gate Arrays (FPGA '12). New York : ACM, 2012. P. 47-56. DOI: 10.1145/2145694.2145704.

15. Ustaoglu, B., Schmitz, K., Große, D. et al. ReCoFused partial reconfiguration for secure moving-target countermeasures on FPGAs // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. 1363. DOI: 10.1007/s42452-020-3003-x.

16. Boudjadar, J., Islam, S. U., Buyya, R. Dynamic FPGA reconfiguration for scalable embedded artificial intelligence (AI): A co-design methodology for convolutional neural networks (CNN) acceleration // Future Generation Computer Systems. 2025. Vol. 169. Article 107777. ISSN 0167-739X. DOI: 10.1016/j.future.2025.107777.

**Тотосько О. В., Стухляк Д. П., Стухляк П. Д.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

### **АРХІТЕКТУРА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ FPGA**

*Зростаюче обчислювальне навантаження в хмарних інфраструктурах, спричинене великомасштабними завданнями аналізу даних та машинного навчання, вимагає ефективних рішень для апаратного прискорення. У цій статті представлено гібридну апаратно-програмну архітектуру, що інтегрує прискорювачі на базі FPGA в хмарну платформу для додатків, що інтенсивно використовують дані та базуються на висновках. Запропонований підхід поєднує реконфігуровану апаратну логіку з контейнерними програмними середовищами, що забезпечує 3–5-кратне підвищення продуктивності та до 40% зниження енергоспоживання порівняно з системами на базі CPU. Експериментальна оцінка показує, що архітектура на базі FPGA забезпечує масштабоване виконання з низькою затримкою, яке підходить для робочих навантажень з високою пропускну здатністю в сучасних центрах обробки даних.*

**Ключові слова:** FPGA, хмарні обчислення, апаратне прискорення, реконфігуровані обчислення, спільне проектування апаратного та програмного забезпечення, машинне навчання.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
05.09.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
03.10.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 631.365

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-4

Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Бучинський В. М., Никитюк А. Г., Брикса А. О.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## РОЗРОБЛЕННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З МІКРОХВИЛЬОВИМИ ОБ'ЄМНИМИ НАГРІВАЧАМИ ОСНАЩЕНОЇ ШНЕКАМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ, ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА РОЗПУШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Сушіння є серйозним етапом післязбиральної обробки зернової сировини, оскільки безпосередньо детермінує збереження її якісних показників та забезпечує перспективу довготривалого зберігання. Тому, з метою забезпечення ефективності даного процесу, було проведено розроблення конструкції сушильної установки, інтегрованої з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами та оснащеної гвинтовими елементами, функціонально призначеними для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів, що реалізується шляхом проведення структурно-схемного синтезу із застосуванням морфологічного аналізу. При побудові моделі системи сушильної установки з морфологічної таблиці до першого ієрархічного рівня були віднесені пріоритетні ознаки, що максимально детермінують ефективність та реалізацію технологічного процесу сушіння зернових матеріалів. До пріоритетних ознак (першого ієрархічного рівня) були віднесені: тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном та діелектричний патрубков. Слід зазначити, що об'єм камери нагріву має пряму кореляційну залежність від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, у зв'язку з чим ці елементи інтегровано в одну підгрупу ієрархічного рівня. Крім того, критичним технологічним аспектом функціонування установки є забезпечення ефективного видалення вологи. Вентиляторну систему охолодження було віднесено до другого ієрархічного рівня. Усі інші структурні елементи класифіковано як третій ієрархічний рівень. На підставі проведеного дослідження було розроблено та запатентовано дві конструкції сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами.

**Ключові слова:** мікрохвильовий об'ємний нагрівач, НВЧ резонатор, магнетрон, морфологічний аналіз, структурно-схемний синтез, гвинтовий

**Постановка проблеми.** Процес сушіння є критичною стадією післязбиральної обробки зернової сировини, оскільки він детермінує збереження її якісних показників та перспективу довготривалого зберігання. Традиційні методи конвективного або комбінованого сушіння, незважаючи на їхнє багаторічне вдосконалення, характеризуються значною енергоємністю та пролонгованою тривалістю. Крім того, ці методи часто спричиняють локальний термічний вплив (перегрів) на зернову масу. Такий термічний стрес ініціює деградацію структурно-механічних властивостей зернівки, редукує її схожість та знижує харчову цінність кінцевого продукту. В контексті сучасних викликів, що обумовлені енергетичною нестабільністю та підвищенням вимог до економічної ефективності агропромислового комплексу, актуалізується необхідність пошуку та імплементації інноваційних технологій сушіння. Першочерговими завданнями для альтернативних методів є забезпечення гомогенності прогріву матеріалу, мінімізація енергетичних витрат та оптимізація (скорочення) часових параметрів технологічного процесу.

Одним із перспективних напрямів у сфері підвищення ефективності сушіння є імплементація технології мікрохвильового (НВЧ) об'ємного нагріву. Цей метод забезпечує безпосередню передачу енергії в об'єм зернового матеріалу, що детерміновано його діелектричними властивостями. Зазначений підхід сприяє прискореній десорбції вологи, зокрема з внутрішніх шарів зернівки, і здатен суттєво підвищити загальну енергоефективність процесу сушіння. Таким чином, виникає необхідність у проведенні комплексних досліджень, спрямованих на пошук технологічних параметрів сушіння зернової сировини під впливом НВЧ випромінювання.

**Аналіз останніх досліджень.** В контексті сучасних умов, що характеризуються підвищеною енергоємністю традиційних технологій сушіння, актуальною науково-технічною проблемою залишається пошук та розроблення методів, які забезпечують інтенсифікацію процесу при одночасній мінімізації питомих енергетичних витрат та запобіганні деградації біологічних властивостей зернової сировини.

Класичні (конвективні) методи сушіння зернового матеріалу характеризуються низкою суттєвих недоліків, зокрема: низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) сушильних установок, ускладненим контролем технологічного процесу та проблемою запобігання локальному перегріву зерна [1]. Додатково слід акцентувати увагу на проблемі недостатньої гомогенності прогріву матеріалу, що сприяє формуванню та активізації шкідливої мікрофлори [2].

Технологія використання НВЧ–випромінювання є предметом активного наукового дослідження впродовж останніх років у різноманітних секторах промисловості, включно з агропромисловим комплексом. Зокрема, у працях Волгушевої Н. В. та Угольнікова О. П. [3] досліджувалися процеси сушіння щільного шару зернових культур (пшениці, ячменю, вівса, гречки) при мікрохвильовому нагріванні. У рамках цих досліджень аналізувалося як безперервне, так і переривчасте підведення мікрохвильової енергії. Також дослідженню кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі присвячена праця Бурдо О. Г., Ярового І. І. та Ружицької Н. В. [4].

Міжнародні дослідження також верифікують перспективність застосування мікрохвильової енергії в процесах сушіння. Зокрема, Hemis, Choudhary та Watson [5] розробили математичну модель одночасного мікрохвильового та конвективного сушіння насіння пшениці, яка дозволяє здійснити точний опис процесів тепломасообміну. Схожі порівняльні дослідження, що охоплювали мікрохвильове та інфрачервоне сушіння, були виконані Chua і Chou [6]. Ними продемонстровано перевагу переривчастого мікрохвильового режиму в контексті збереження якісних показників біопродуктів. Комплексне узагальнення фізичних основ, моделей тепломасообміну та практичних аспектів застосування мікрохвильової енергії для харчових та аграрних матеріалів представлено у монографії Feng, Yin та Tang [7].

Крім того, при сушінні зерна широко використовуються різні типи шнекових механізмів необхідних для його транспортування та перемішування і розпушування при видаленні вологи. Проблематиці створення, дослідження та оптимізації гвинтових механізмів, що виконують функції транспортування, змішування та інші технологічні операції, присвячено значний масив наукових праць. Науковці зосереджували свою увагу як на розробленні та впровадженні методик для синтезу нових конструктивних рішень гвинтових механізмів [8–13], так і на теоретичному та експериментальному аналізі аспектів їх функціонування [14–25]. Відтак, проблематика розроблення, дослідження аспектів функціонування, розрахунку та визначення раціональних параметрів гвинтових механізмів знайшла своє відображення у працях таких науковців, як Б. Гевко [17], Р. Рогатинський [17–19, 20, 25], О. Ляшук [11, 12, 18, 20–25], В. Гудь [10, 18–24], О. Дмитрів [16, 19, 22] та низки інших дослідників. Проте незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, актуальність розроблення та вивчення нових конструктивних рішень зазначених механізмів залишається високою. Це детерміновано тим, що різні сектори економіки, зокрема сільськогосподарське виробництво, висувають специфічні вимоги до виконання технологічних операцій, що зумовлює необхідність адаптації та модернізації існуючих, а також синтезу принципово нових конструкцій.

Резюмуючи результати аналізу наукових джерел, правомірно стверджувати, що тематика сушіння зернового матеріалу із застосуванням мікрохвильових (НВЧ) об'ємних нагрівачів характеризується високим ступенем актуальності. Ця актуальність обумовлена необхідністю розроблення енергоефективних та технологічно досконалих методів післязбиральної обробки, здатних мінімізувати термічну деградацію сировини.

**Метою роботи.** Метою роботи є розроблення конструкцій сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами оснащених гвинтовими елементами для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів шляхом проведення структурно–схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу.

**Виклад основного матеріалу.** Сушіння зернових матеріалів є однією з обов'язкових і пріоритетних операцій під час збору врожаю у сільському господарстві, бо інакше при зберіганні вологе зерно спарюється і втрачає свою придатність до подальшого зберігання та використання. Операцію сушіння зернового матеріалу проводять із застосуванням різноманітних типів установок. Ці установки у якості енергетичних засобів споживають природний газ, мазут та солярку, що є досить дорого і енерговитратно для великих та малих фермерських господарств. Крім того, вони також є досить дорогими у закупівлі, монтажі та обслуговуванні, що часто робить їх недосяжними для дрібних фермерів та с/г підприємств.

Технологічний процес із використанням сушильної установки, оснащеної мікрохвильовим об'ємним нагрівачем, реалізується у кілька ключових етапів, як показано на

рисунку 1. На початковому етапі процесу зерно з бункера 1 через перевантажувальний патрубок 2 самопливом надходить до мікрохвильового об'ємного нагрівача 3. Далі здійснюється мікрохвильова обробка з допомогою мікрохвильового об'ємного нагрівача 3, який містить НВЧ-резонатор 4, діелектричний патрубок 5 та магнетрон 6. Блок управління 7 задає режим роботи магнетрона 6, який генерує НВЧ-хвилі. Під дією цих хвиль відбувається об'ємне нагрівання зерна. При цьому температура нагрітого зерна постійно контролюється давачем температури 8, встановленим у перевантажувальному патрубку 9. Швидкість проходження зерна через об'ємний нагрівач регулюється шнековим дозатором 11. Це забезпечує відповідну модель транспортування матеріалу та необхідний час реалізації основної операції сушіння [7, 8]. Далі нагріте зерно після нагрівача спрямовується до камери попереднього охолодження 10, у якій розташовано лопатевий чи іншої конструкції шнек (на рисунку не показаний) для розпушування та перемішування матеріалу при його охолодженні (обдуві) вентилятором 16. З камери попереднього охолодження 10 зерно потрапляє до шнекового дозатора 11, з якого через перевантажувальний патрубок 12 надходить у камеру кінцевого охолодження 13 для подальшого охолодження (обдуву) вентилятором 15. Камера кінцевого охолодження 13 також оснащена лопатевим чи іншої конструкції шнеком (на рисунку не показаний) для розпушування та перемішування матеріалу при його охолодженні (обдуві) вентилятором 15. Швидкість переміщення зерна шнековим дозатором 11 регулюється частотою обертання шнека з електронного приводу шнекового дозатора 17. Далі зерно вивантажується через перевантажувальний патрубок 14, або, при потребі подальшого сушіння за визначенням його вологості вологоміром, може шнеком перевантажуватись до бункера 1 для повторного оброблення. Запропонована технологія дозволяє забезпечити дешевий та високоефективний процес сушіння зернового матеріалу.

Головним структурно-функціональним компонентом мікрохвильової сушильної системи є камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву. Зазначена НВЧ-камера являє собою основний робочий вузол сушильної установки, що призначений для здійснення об'ємного електромагнітного нагрівання матеріалу. Це нагрівання реалізується за рахунок впливу мікрохвильового випромінювання у визначеному діапазоні частот 300 МГц...300 ГГц. У контексті технології дегідратації зернових культур, НВЧ-камера забезпечує гомогенне (рівномірне) прогрівання всієї зернової маси в об'ємі. Цей ефект досягається завдяки глибокому проникненню електромагнітного поля у внутрішні шари матеріалу, що, відповідно, призводить до інтенсифікації процесу вологовидалення (сушіння) порівняно з традиційними конвективними методами.

Принцип дії камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву базується на фізичному явищі діелектричних втрат, які виникають у вологому діелектричному матеріалі під впливом змінного електромагнітного поля. Коли мікрохвильове випромінювання проходить крізь зернову масу, полярні молекули води прагнуть до орієнтації відповідно до вектора змінного електричного поля. Зважаючи на високу частоту цього поля (типово 2,45 ГГц), молекули не встигають завершити повну переорієнтацію, що спричиняє внутрішнє молекулярне тертя. Це тертя, у свою чергу, призводить до ефективного перетворення електромагнітної енергії на теплову. Таким чином, енергія поглинається об'ємно – по всьому внутрішньому об'єму матеріалу, що є відмінним від поверхневого нагріву, характерного для конвективних методів.

Для підвищення ефективності технологічного процесу конструктивне рішення камери нагріву передбачає низку функціональних вимог:

1. Гомогенний (рівномірний) розподіл електромагнітного поля у робочому об'ємі. Цей розподіл досягається шляхом застосування спеціалізованих елементів: хвилеводів, розсіювачів або систем механічного чи електродинамічного мішання поля.

2. Регулювання інтенсивності випромінювання. Контроль параметрів випромінювання здійснюється за допомогою керованого магнетрона та інтегрованого високовольтного модулятора.

3. Забезпечення радіаційної безпеки шляхом екранування робочої зони. Екранування необхідне для запобігання несанкціонованому витоку НВЧ-випромінювання за межі конструкції камери.

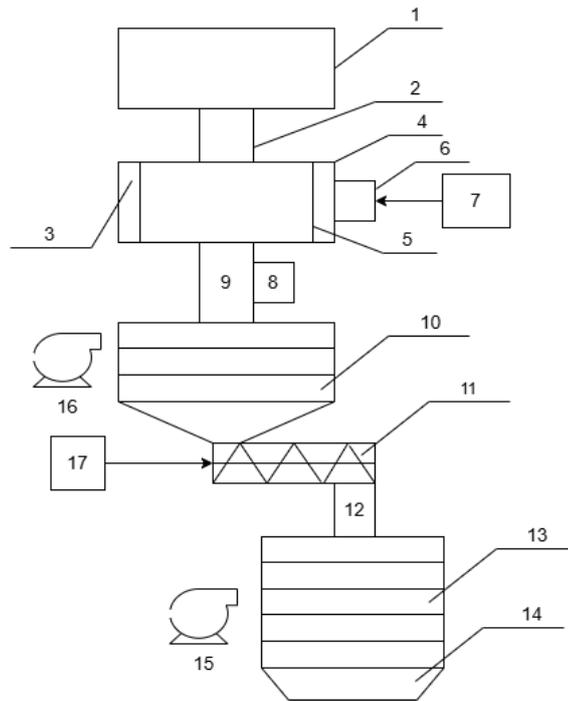


Рисунок 1 – Загальна схема мікрохвильової сушильної установки:

- 1 – бункер; 2, 9, 12, 14 – перевантажувальні патрубки; 3 – мікрохвильовий об'ємний нагрівач;  
 4 – магнетрон з НВЧ-резонатором; 5 – діелектричний патрубок; 6 – магнетон;  
 7 – блок управління магнетроном; 8 – датчик температури; 10 – камера попереднього охолодження; 11 – шнековий дозатор; 13 – камера кінцевого охолодження; 15, 16 – вентилятори;  
 17 – електропривід шнекового дозатора з електронним керуванням

У типовій НВЧ-сушильній системі генерація мікрохвильового випромінювання здійснюється за допомогою магнетрона, після чого енергія транспортується у робочу камеру нагріву через хвилевід. Електромагнітна енергія поглинається матеріалом (у нашому випадку зерно), що ініціює підвищення її температури та процес пароутворення (випаровування вологи). Утворені пари необхідно відводити з робочої зони шляхом застосування примусової конвекції (поток повітря) або використання вакуумної системи. Обсяг теплової енергії, що генерується безпосередньо у матеріалі, визначається питомими діелектричними втратами.

На рисунку 2 зображено спрощену схему камери нагріву НВЧ. Основними її елементами є: магнетрон 1, який генерує електромагнітні коливання надвисокої частоти; камера нагріву 2, де розміщується об'єкт сушіння (наприклад, зерно); хвилі НВЧ 3, що багаторазово відбиваються від стінок камери, забезпечуючи рівномірний розподіл енергії; діелектричний патрубок 4, який слугує каналом для подачі мікрохвильового випромінювання від магнетрона до робочого об'єму.

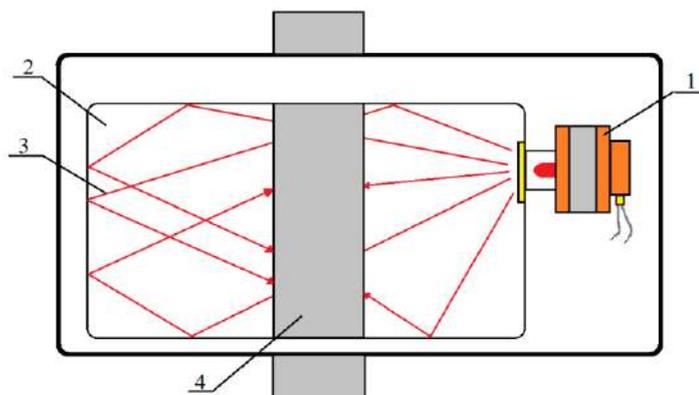


Рисунок 2 – Камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву:

- 1 – магнетрон; 2 – камера нагріву; 3 – НВЧ хвилі; 4 – діелектричний патрубок

Відтак, з метою здешевлення даного процесу, нами розроблено технологічний процес сушіння зернових культур в сушильних камерах з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами і для його реалізації проведено пошук конструкцій відповідних систем шляхом їх генерування за допомогою вдосконаленого метод синтезу за допомогою морфологічного аналізу [9–13].

За результатами експертної оцінки впливу багатофакторних чинників на ефективність операцій технологічного процесу термічної обробки (сушіння) зернових культур в сушильних камерах, оснащених мікрохвильовими об'ємними нагрівачами, було ідентифіковано ключові морфологічні ознаки конструктивних елементів сушильних установок, а також встановлено їхні міжсистемні корелятивні зв'язки. Дана ідентифікація забезпечила емпіричну основу для побудови морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів (табл. 1). На базі зазначеної таблиці було, відповідно, синтезовано модель системи (рис. 3), що репрезентує «Сушильну установку з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами». В процесі структурно–схемного синтезу сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами, на основі детального експертного аналізу, було обрано та зафіксовано наступні основні морфологічні ознаки конструктивних елементів системи: тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ–резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок, термодатчик (діапазон вимірювання, тип показів), вентиляторна система охолодження, гвинтовий робочий орган (профіль спіралі, конструкція спіралі, конструкція патрубку), бункер (профіль, об'єм, наявність додаткових елементів, принцип вивантаження), механізм розвантаження, опорно–руховий механізм.

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами

1. Тип приводу	2. Камера нагріву	3. Магнетрон з НВЧ–резонатором	4. Блок керування магнетроном	5. Діелектричний патрубок
1.1. Електропривід нерегульований 1.2. Електропривід регульований	2.1. Мала (до 32 л) 2.2. Середня (до 100 л) 2.3. Велика (більше 100 л)	3.1. Малий (500...700 Вт) 3.2. Середній (700...900Вт) 3.3. Великий (більше 900 Вт)	4.1. Трансформа–торний 4.2. Інверторний 4.3. Імпульсний	5.1. Пластмасовий 5.1. Скляний 5.3. Текстолітовий
Термодатчик		8. Вентиляторна система охолодження		
6. Діапазон вимірювання	7. Тип показів			
6.1. 0–120 °С 6.2. +40–+120 °С 6.3. –50–+150 °С	7.1. Механічний 7.2. Аналоговий 7.3. Стрілочний 7.4. Електричний (резистивний)	8.1. Вертикальна (повітря подається знизу вгору через шар зерна) 8.2. Горизонтальна (повітря подається збоку або з торця сушильної камери) 8.3. Комбінована (поєднання вертикального і горизонтального напрямків)		
Гвинтовий робочий орган				
9. Профіль спіралі		10. Конструкція спіралі	11. Конструкція патрубку	
9.1. Суцільна 9.2. Стрічкова 9.3. Лопатева без регулювання отворів 9.4. Лопатева з регулюванням отворів 9.5. Гофрована 9.6. З розрізами, отворами чи вирізами 9.7. Вузькострічкова 9.8. Широкострічкова 9.9. Еластична 9.10. Із загинами на зовнішній кромці спіралі 9.11. Пружинна (кругла) 9.12. Зі змінними додатковими елементами		10.1. З одним кроком 10.2. З різним кроком 10.3. Однозахідна 10.4. Багатозахідна 10.5. Однакова 10.6. Різна 10.7. З валом 10.8. Безвальна 10.9. Циліндрична 10.10. Конічна 10.11. Лівостороння 10.12. Правостороння	11.1. U–подібний 11.2. Круглий 11.3. Конічний 11.4. Оригінальної форми	

Бункер			
12. Профіль	13. Об'єм	14. Наявність додаткових елементів	15. Принцип вивантаження
12.1. Суцільний	13.1. Постійний	14.1. Використовуються	15.1. Гравітаційний
12.2. Секційний	13.2. Змінний	14.2. Не використовуються	15.2. Активний
16. Механізм розвантаження		17. Опорно-руховий механізм	
16.1. Розвантажувальний отвір з шибером		17.1. Без можливості зміни розташування конструкції	
16.2. Розвантажувальний патрубок з шибером		17.2. З можливістю зміни розташування конструкції	

При побудові моделі системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» з морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів до першого ієрархічного рівня були віднесені найголовніші ознаки, від яких максимально залежить виконання технологічного процесу сушіння зернових. Це зокрема тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок. При чому об'єм камери нагріву напряму залежить від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, а, тому, їх віднесено до одної підгрупи ієрархічного рівня. Також важливим аспектом у діяльності установки є видалення вологи. Відтак, вентиляторну систему охолодження ми віднесли до другого ієрархічного рівня. Усі інші елементи були віднесені до третього ієрархічного рівня. Це, зокрема, діапазон вимірювання і тип показів термодатчика, профіль спіралі, конструкція спіралі та конструкція патрубку гвинтового робочого органу, профіль, об'єм, наявність додаткових елементів та принцип вивантаження бункера, механізм розвантаження та опорно-руховий механізм.

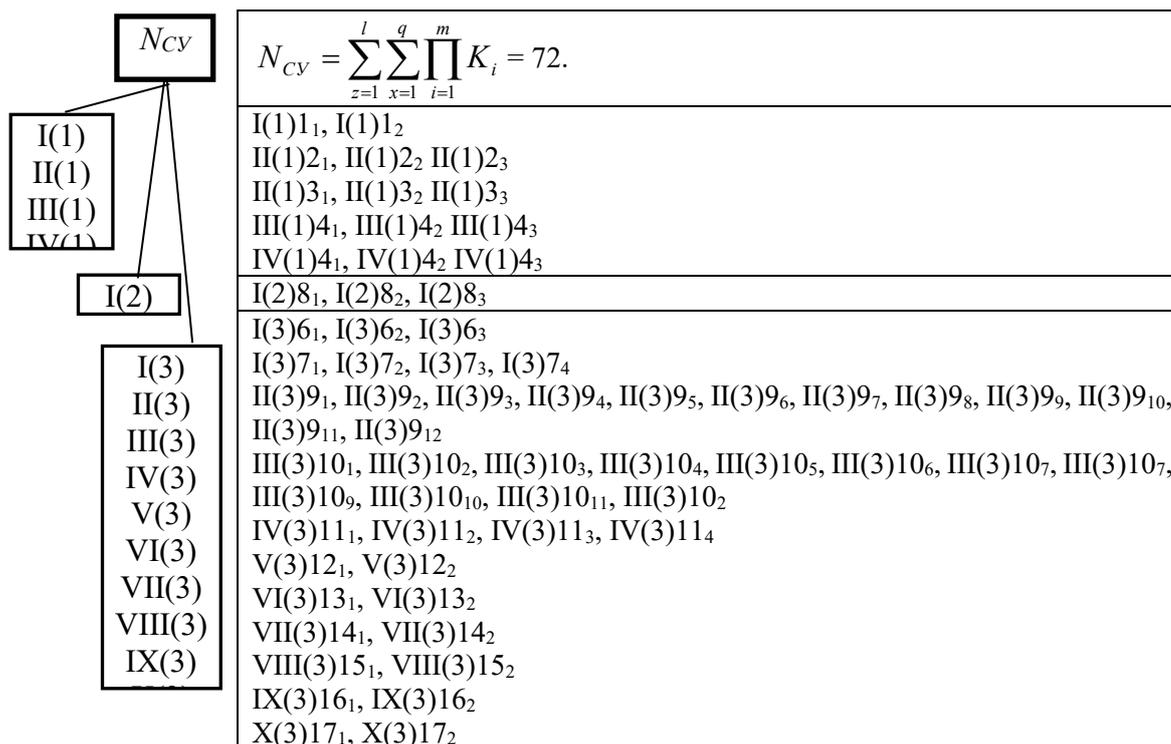


Рисунок 3 – Модель системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами»: I-X – підгрупи ієрархічного рівня; (1)-(3) – відповідні ієрархічні рівні

На основі проведеного дослідження нами розроблено конструктивну схему мікрохвильової сушильної установки (рис. 4), а також подано заявки на отримання патентів на корисну модель України та отримано патенти на корисну модель України «Сушильна камера з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» [26] та «Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» [27]. Розроблена мікрохвильова сушильна установка (рис. 4) включає бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу 1, з якого зернова сировина потрапляє у діелектричний патрубок 2 камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3, де завдяки магнетрону з НВЧ-резонатором 4, який генерує електромагнітні коливання

надвисокої частоти, зерно нагрівається і випаровує вологу. Температура нагрівання зерна контролюється термодатчиком 5 з блоку управління елементами установки 21. Тривалість проходження зерна у камері надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3 регулюється шнековим дозатором 11, частота обертання якого також визначається електронним керуванням електроприводу шнекового дозатора 12 з блоку управління елементами установки 21. З камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3 зерно з діелектричного патрубку 2 потрапляє до камери (бункера) попереднього охолодження 6, де зерно піддається обдуву вентиляторами 8 і завдяки гвинтовому робочому органу для змішування та розпушування сипкого матеріалу 7 інтенсивно переміщується та осушується. Далі через перевантажувальний патрубок 10 зерно потрапляє до шнекового дозатора 11, а з нього через перевантажувальний патрубок 13 до камери (бункера) кінцевого охолодження 14, де проводиться аналогічна процедура, як і в камері (бункері) попереднього охолодження 6. З камери (бункера) кінцевого охолодження 14 зерно через перевантажувальний патрубок 15 потрапляє до вивантажувального шнека 16. Якщо при заборі проб на вологість зерно відповідає встановленим нормам, то проводиться його вивантаження у відповідну ємність через розвантажувальний отвір з шиберам 18. Якщо існує потреба у його подальшому просушуванні, то його з допомогою перевантажувального гнучкого шнека 19 пересипають у бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу 1 для повторного проведення процесу сушіння. Електроприводи гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу 9 та вивантажувального шнека 17 керуються з блоку управління елементами установки 21.

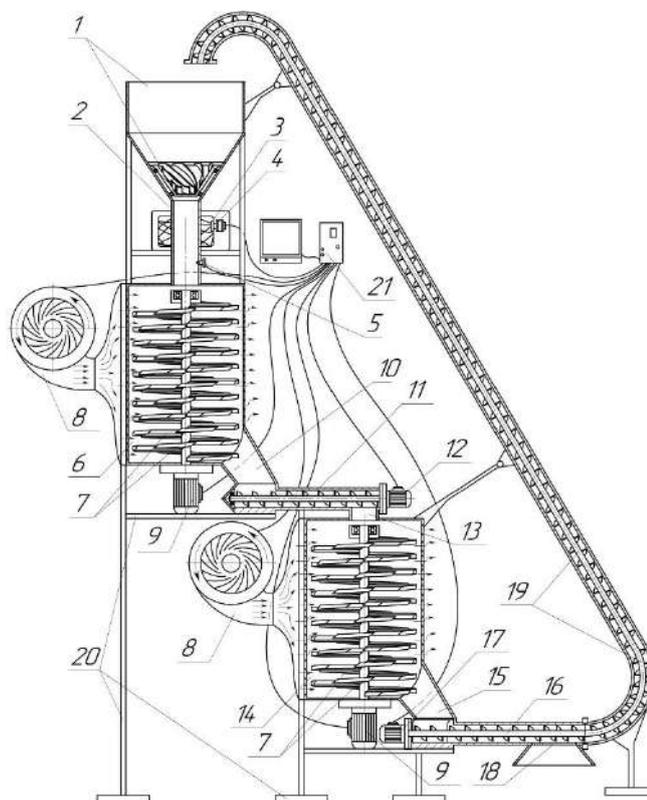


Рисунок 4 – Конструктивна схема розробленої мікрохвильової сушильної установки: 1– бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу; 2 – діелектричний патрубок; 3 – камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву; 4 – магнетрон з НВЧ–резонатором; 5 – термодатчик; 6 – камера (бункер) попереднього охолодження; 7 – гвинтові робочі органи для змішування та розпушування сипкого матеріалу; 8 – вентилятори; 9 – електроприводи гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу; 10, 13, 15 – перевантажувальні патрубки; 11 – шнековий дозатор; 12 – електропривід шнекового дозатора з електронним керуванням; 14 – камера (бункер) кінцевого охолодження; 16 – вивантажувальний шнек; 17 – електропривід вивантажувального шнека; 18 – розвантажувальний отвір з шиберам; 19 – перевантажувальний гнучкий шнек; 20 – опорно–руховий механізм; 21 – блок управління елементами установки

Перевагами гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу (рис. 5) є можливість регулювання величини зазору між лопатями спіралей для інтенсифікації процесу змішування і розпушування зернових матеріалів різних фракцій. В конструкції розробленої мікрохвильової сушильної установки (рис. 4) їхньою функцією є переміщення зернового матеріалу при його осушенні (обдуві) в камерах (бункерах) попереднього і кінцевого охолодження знизу вгору, де зерно проковзуючи по спіралях попадатиме в зазор між лопатями спіралей і просипається донизу, забезпечуючи можливість його кращого осушення (обдув).

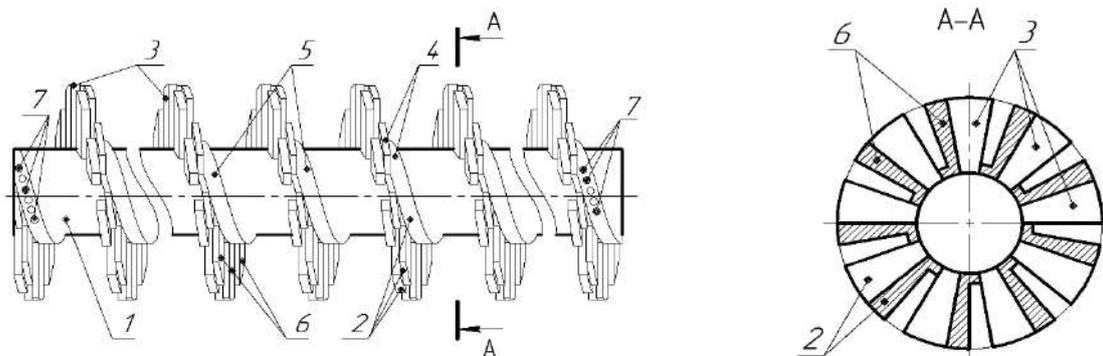


Рисунок 5 – Гвинтовий робочий орган для змішування та розпушування сипкого матеріалу [28]:  
1 – вал; 2 – гвинт; 3 – базова лопатева спіраль; 4 – спіраль Г-подібної форми; 5 – внутрішня частина спіралі Г-подібної форми; 6 – зовнішня частина спіралі Г-подібної форми

**Висновок.** Проведено розроблення конструкції сушильної установки з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами оснащеної гвинтовими елементами для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів шляхом проведення структурно-схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу. При побудові моделі системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» з морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів до першого ієрархічного рівня були віднесені найголовніші ознаки, від яких максимально залежить виконання технологічного процесу сушіння зернових. Це зокрема тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок. При чому об'єм камери нагріву напряму залежить від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, а тому, їх віднесено до одної підгрупи ієрархічного рівня. Також важливим аспектом у діяльності установки є видалення вологи. Вентиляторну систему охолодження віднесено до другого ієрархічного рівня. Усі інші елементи були віднесені до третього ієрархічного рівня. Це, зокрема, діапазон вимірювання і тип показів термодатчика, профіль спіралі, конструкція спіралі та конструкція патрубку гвинтового робочого органу, профіль, об'єм, наявність додаткових елементів та принцип вивантаження бункера, механізм розвантаження та опорно-руховий механізм. На основі проведеного дослідження розроблено і запатентовано конструкції сушильної камери з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами та Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами.

#### Інформаційні джерела

1. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Борта А. В. Сушіння зерна. Одеса: Видавництво «Одеса», 2021. 348 с.
2. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Янюк Т. І., Рибчинський Р.С. Сушіння та зберігання зерна: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 395 с.
3. Волгушева Н. В., Угольніков О. П. Кінетика мікрохвильового сушіння зерна в нерухомому шарі. *Холодильна техніка та технологія*. 2023. № 59. С. 128-135. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>
4. Дослідження кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі / О. Г. Бурдо, І. І. Яровий, Н. В. Ружицька // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2010. Вип. 38(1). С. 101-105. Режим доступу: URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np201038%281%2927>

5. Hemis M., Choudhary R., Watson D.G. A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds. *Biosystems Engineering*. 2012. Vol. 111. P. 220-227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.002>
6. Chua K.J., Chou S.K. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science and Technology*. 2005. Vol. 40. P. 23-39. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.00903.x>
7. Hao Feng, Yun Yin, Juming Tang. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*. 2012. Vol. 4, Iss. 2. P. 89-106. URL: <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
8. Васильків В. В., Гевко І. Б., Бабарика С. Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ. 2009. №2. С. 170-173.
9. Гевко І. Б. Структурний синтез імпульсних запобіжних муфт і шнеків методом морфологічного аналізу. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль. 2012. № 3(67). С. 121-134.
10. Гевко І. Б., Гудь В. З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Технічні науки. 2019. Вип. 2(33). С. 25-33. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).25-33](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).25-33)
11. Гевко І. Б., Ляшук О.Л., Клендій В.М. Синтез гвинтових конвеєрів з гнучкими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. 2014. № 18. С. 112-121.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Пік А. І., Марчук Н. М., Маруніч О. П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*. Випуск 45. Луцьк. 2020. С. 35-44. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.380>
13. Гевко І. В., Довбуш Т., Цьонь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*. Вип. 47. Луцьк. 2021. С. 63-72. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.649>
14. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль. 2011. Том 16. № 1. С. 69-77.
15. Гевко І. Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, спец.: 05.20.01. Луцьк, 1997. 18 с.
16. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
17. Гевко Б. М., Данильченко Б. М., Рогатинський Р. М., та ін. Механізми з гвинтовими пристроями. Львів: Світ. 1993, 208с.
18. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
19. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.381>
20. Hud V., Rogatynskyy R., Hevko I., Lyashuk O., Pic A., Huryk O. Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest, 2020. Vol. 60, № 1. P. 29-36. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-03>
21. Lyashuk O. L., Hevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Hevko O. V., Sokol M. O., Tson O.P., Kobelnyk V.R., Shmatko D.Z., Stanko A.I. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw – fluid medium" system. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest. 2022. Vol. 68. № 3. P. 499-510. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-68-49>
22. Hud V., Hevko, I., Lyashuk O., Hevko O., Sokil M., Shust I. Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations. *Karaganda*. 2020. № 2 (98). P. 119–126. URL: <https://doi.org/10.31489/2020ph2/119-126>

23. Hevko, I., Lyashuk, O., Sokil M., Hud V., Solobodian L., Vovk Yu. Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. *Karaganda State University Publishing house*. Karaganda. 2019. № 2 (94). P. 73–81. URL: <https://doi.org/10.31489/2019Ph2/73-81>

24. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.–V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. № 4. P. 870. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>

25. Rogatinskiy R., Hevko I., Dyachun A., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra. 2019. № 4. P. 140–145. URL: <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0025>

26. Сушильна камера з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами. Пат. на корисну модель 154022 Україна. № u202301515; заявл. 07.04.2023р.; опубл. 28.09.2023р., Бюл.№39.

27. Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами. Пат. на корисну модель 155884 Україна. № u202303608; заявл. 26.07.2023р.; опубл. 18.04.2024р., Бюл.№16.

28. Гвинтовий робочий орган змішувача. Пат. на корисну модель 153774 Україна. №u202301002; заявл. 13.13.2023р.; опубл. 24.08.2023р., Бюл.№34.

**Hevko I., Dovbush T., Buchinsky V., Nikityuk A., Briksa A.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

#### **DEVELOPMENT OF A DRYING UNIT WITH MICROWAVE VOLUME HEATERS EQUIPPED WITH SCREWS FOR TRANSPORTING, MIXING AND DISSOLVING MATERIALS**

*Drying is a serious stage of post-harvest processing of grain raw materials, as it directly determines the preservation of its quality indicators and ensures the prospect of long-term storage. Therefore, in order to ensure the efficiency of this process, a design of a drying unit integrated with microwave volumetric heaters and equipped with screw elements functionally designed for transporting, mixing, and loosening materials was developed. This is implemented by conducting structural-schematic synthesis using morphological analysis. When building a model of the system "Drying unit with microwave volumetric heaters" using a morphological table of key features of structural elements, priority features that maximally determine the efficiency and implementation of the technological process of drying grain materials were assigned to the first hierarchical level. The priority features (of the first hierarchical level) included: drive type, heating chamber, magnetron with microwave resonator, magnetron control unit, and dielectric nozzle. It should be noted that the volume of the heating chamber has a direct correlation with the power of the magnetron with a microwave resonator, and therefore these elements are integrated into one subgroup of the hierarchical level. In addition, a critical technological aspect of the plant's operation is ensuring effective moisture removal. The fan cooling system was assigned to the second hierarchical level. All other structural elements are classified as the third hierarchical level. It includes the measurement range and type of indication of the temperature sensor, the profile and design of the spiral, the design of the screw working body nozzle, the profile, the volume, the presence of additional elements and the principle of unloading the hopper, the unloading mechanism and the supporting and moving mechanism. Based on the research conducted, the designs "Drying chamber with microwave volumetric heaters" and "Mobile automobile drying unit with microwave volumetric heaters" were developed and patented (registration certificate).*

**Key words:** *microwave volume heater, microwave resonator, magnetron, morphological analysis, structural-schematic synthesis, screw.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
06.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
15.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 539.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-5

Грабар І. Г., Жуковський О. Є.

Поліський національний університет

### АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ МЕХАНІЧНО ПОЄДНАНИХ ВАЛІВ З ПЕРЕМІННИМ ЦЕНТРОМ МАС ОДНОГО З НИХ НА ПРИКЛАДІ КАРТОРОБНОЇ МАШИНИ «DORIS»

У статті досліджуються перехідні процеси в електромеханічній системі, що складається з двох механічно поєднаних валів з індивідуальними приводами, один з яких зазнає значної періодичної зміни центру мас. Перехід промисловості до децентралізованих приводів спрощує механічні конструкції, але ускладнює динамічну взаємодію між вузлами, особливо за наявності змінних інерційних параметрів, що може призводити до параметричного збудження та втрати стійкості системи. Метою роботи є експериментальний аналіз впливу зміни центру мас одного з валів на динаміку та коефіцієнт пропорційності моментів на головному та допоміжному приводах. Методологія дослідження полягає у вимірюванні та аналізі миттєвих значень моменту на валах приводних двигунів карторобної машини «Doris» під час технологічного циклу скидання рулону. Експеримент проводився для трьох різних мас намотаного картону: 100 кг, 250 кг та 530 кг, що дозволило оцінити динаміку системи при різному ступені ексцентриситету. Результати показали, що зі збільшенням маси рулону та, відповідно, зміщення центру мас, проста лінійна кореляція між моментами головного та допоміжного приводів втрачається. Однак детальний аналіз процесу скидання рулону виявив складний, але стійкий нелінійний зв'язок, що апроксимується поліномом третього ступеня з високим рівнем кореляції. Графік цієї залежності має характерну точку перегину, що відповідає зміні напрямку зміщення центру мас барабана.

Встановлено, що значна періодична зміна центру мас є ключовим дестабілізуючим фактором, що призводить до виникнення параметричної нестійкості. Виявлений нелінійний характер взаємозв'язку моментів є емпіричним підтвердженням цього явища. Це доводить принципову недостатність стандартних систем керування зі стабілізацією швидкості та обґрунтовує необхідність розробки адаптивних алгоритмів, здатних ідентифікувати змінні параметри системи та активно демпфувати параметричні коливання.

**Ключові слова:** механічно поєднані вали, перехідні процеси, змінний центр мас, роторна динаміка, параметричне збудження, кореляція моментів, стабілізація швидкості.

**Постановка проблеми.** Раніше кінематичні системи з багатьма валами, які механічно поєднані між собою, керувалися від одного головного приводу, що забезпечувало синхронне обертання, але вимагало складної і вимогливої до механічної стійкості конструкції. Сучасні системи електроприводу дозволяють відмовитися від одного головного електроприводу, та поставити локальні привідні двигуни в кожну точку кінематичної схеми. Це дозволяє забезпечити синхронізацію на основі мікропроцесорної системи електроприводу. Даний метод набагато спрощує процес конструювання механіки систем, але викликає потребу розуміння природи поведінки механічно зв'язаних між собою валів з окремими привідними точками.

**Аналіз літературних джерел.** Сучасна роторна динаміка є галуззю, що безперервно розвивається, стимульована невідповідними вимогами промисловості до підвищення ефективності, надійності та продуктивності обертового обладнання. Промислові рушії, із прагнення до вищих робочих швидкостей, збільшення питомої потужності та розробка легших, більш гнучких конструкцій роторів, кардинально змінили ландшафт інженерних викликів.[1] Ці тенденції змушують сучасні машини, від авіаційних двигунів до промислових турбокомпресорів, працювати на швидкостях, що значно перевищують їхні перші, а іноді й другі та треті критичні швидкості.[3] У таких режимах динамічна поведінка системи перестає бути вторинним фактором і стає першочерговим проектним обмеженням.

Класичні підходи, що розглядали ротори як жорсткі тіла, виявилися недостатніми для опису складних явищ, що виникають у високошвидкісних гнучких системах.[4] Значні інерційні сили та моменти, що виникають при високих кутових швидкостях, призводять до суттєвих пружних деформацій, які неможливо ігнорувати.[4] Це призвело до необхідності розглядати роторні системи як складні коливні системи, що складаються з валів, дисків, лопаток та інших

елементів, які підтримуються підшипниками та взаємодіють зі стаціонарними компонентами, такими як корпуси та фундаменти.[4] Розуміння та прогнозування динамічної поведінки, зокрема вібрацій та стійкості, стало ключовим для забезпечення безпечної та довготривалої експлуатації.[1] Незбалансованість ротора, хоч і є фундаментальною причиною вібрацій, вже не розглядається як єдиний значущий фактор. Дестабілізуючі ефекти від ущільнень, підшипників, внутрішні резонанси та теплові ефекти можуть призводити до небезпечних автоколивань, що вимагає значно глибшого аналізу.[1]

У контексті сучасної роторної динаміки аналіз перехідних процесів набуває особливої ваги. Перехідний процес визначається як електромагнітний або механічний процес, що виникає при переході системи від одного усталеного стану до іншого.[5] У роторних системах це охоплює широкий спектр режимів, що відрізняються від стаціонарної роботи: запуск та зупинка машини, проходження через критичні швидкості, а також реакція на раптові збурення, такі як втрата лопатки, ударні навантаження або різкі зміни в робочому процесі.[6]

Аналіз перехідних процесів є найбільш комплексним підходом до дослідження динаміки системи, оскільки він дозволяє отримати вичерпну інформацію про критичні швидкості, вимушені коливання, стійкість, а також реакцію на ударні навантаження, особливо для систем з нелінійними характеристиками.[6] Саме в перехідних режимах роторні системи є найбільш вразливими. Проходження через резонансні зони (критичні швидкості) супроводжується різким зростанням амплітуд вібрацій, що може призвести до контакту ротора зі статором (затирання), передчасного зносу підшипників або навіть катастрофічного руйнування конструкції.[7] Тому точне прогнозування та оцінка нестационарних навантажень і деформацій під час цих режимів є першочерговим завданням для коректного проектування.[9]

Змінність маси фундаментально змінює математичний опис системи, перетворюючи її керівні рівняння з лінійних стаціонарних (Linear Time-Invariant, LTI) на лінійні з періодично змінними в часі параметрами (Linear Time-Periodic, LTP) або, у загальному випадку, на повністю нелінійні, нестационарні системи.[10].

Така трансформація має глибокі фізичні наслідки. Головним з них є виникнення параметричного збудження. Це явище, при якому періодична зміна параметрів системи (таких як жорсткість, маса або момент інерції) може призвести до експоненційного зростання амплітуди коливань і втрати стійкості, навіть за відсутності зовнішніх синхронних сил [10]. Таким чином, аналіз стійкості системи перестає обмежуватися лише уникненням критичних швидкостей і вимагає ідентифікації та уникнення зон параметричної нестійкості.

Інші моменти дослідження динаміки механічно поєднаних валів розглядалися в [11-32].

**Мета дослідження.** Метою дослідження являється аналіз перехідних процесів які відбуваються на головному та допоміжному приводі для оцінки коефіцієнту пропорційності моменту на валу, та вплив перехідних процесів на нього.

**Матеріали і методи досліджень.** В якості типового зразка системи з механічно пов'язаними валами та з наявністю валу з змінним центром маси розглянемо картоноробну машину Doris (рис. 1) яка застосовується для випуску якісного електротехнічного картону з целюлозної маси.

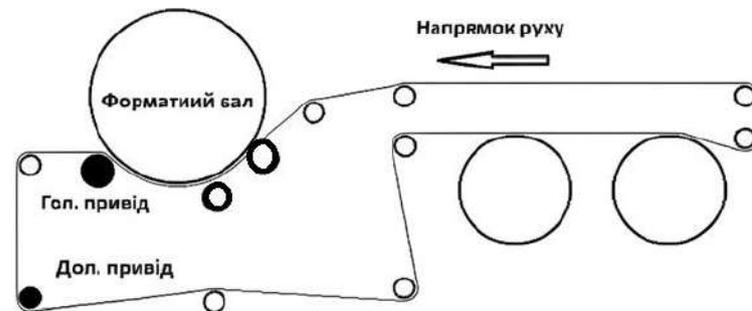


Рисунок 1 – Схема протяжки волокна з вказанням приводних точок

Машина безкінечно транспортує елементарний шар картону на транспортному полотні і виконує його намотку на форматний вал. Товщина картону залежить від кількості намотаних шарів та товщини елементарного шару. Після досягнення заданої кількості шарів відбувається відсічка елементарного шару і радіальний зруб намотаного мокрого листа картону. Таким чином

під час останнього моменту зрубу для даного листа картону відбувається його змотування з форматного валу і початок намотування наступного листа. Після чого цикл повторюється. Асортимент технологічних товщин виробляємої продукції залежить від кількості шарів намотки та товщини елементарного шару.

Головний привід обертає вал, який забезпечує прижим транспортного полотна до форматного валу, та обертає безпосередньо сам форматний вал. Допоміжний привід виконує безпосередньо протяжку транспортного полотна.

Головний привід та допоміжний привід налаштовані таким чином, щоб забезпечити підтримання стабільної швидкості транспортного полотна. Тому обертова швидкість їх стабільна. Технологічно швидкість допоміжного приводу становить 99% швидкості головного приводу. Таке технологічне підгальмовування забезпечує передачу елементарного шару з транспортного полотна на форматний вал.

Система управління забезпечує стабілізацію швидкості, яка є константою в заданих діапазонах регулювання.

Для проведення дослідження було виконано замір моментів на валу двигунів під час процесу зрубу і сходження листа картону розміром 6500x3250мм (ДxШ) для трьох марок картону «1мм» (15 елементарних слоїв 100кг, 3мм фактичної товщини мокрої папки) «3,3мм» (45 елементарних слоїв 250 кг 11 мм фактичної товщини мокрої папки), «7мм» (93 елементарні слої 530кг 24мм фактичної товщини мокрої папки). Графіки наведені на рисунку 2-4. Ряд 1 – дані з головного приводу, Ряд 2 – дані з допоміжного приводу.

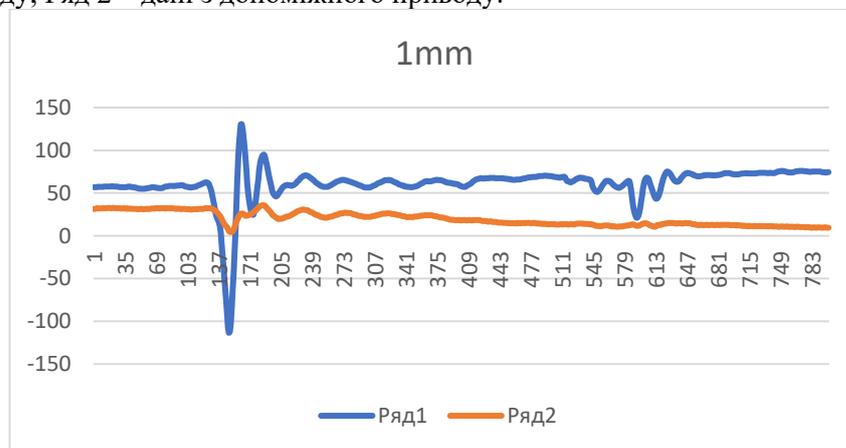


Рисунок 2 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «1 мм»

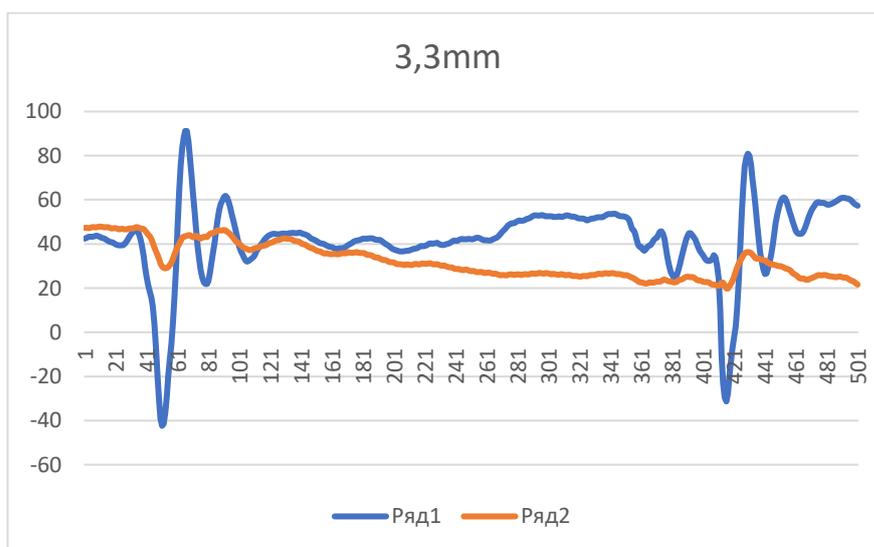


Рисунок 3 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «3,3 мм»

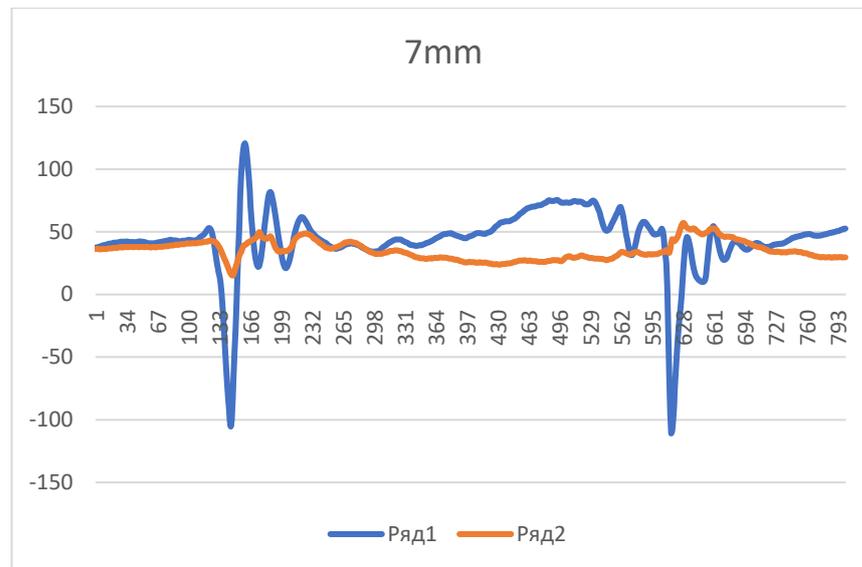


Рисунок 4 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «7 мм»

Розглянемо перехідний процес головного двигуна. Дані графіки мають два збурення на початку і в кінці процесу зрубу. Перше збурення практично ідентичне – так як це збурення викликане ножом який виконує зруб папки і викликає радіальне збурення моменту на валу двигуна. Збурення на кінці процесу викликане ударами прижимних валів під час сходження намотаного листа картону, тому вони залежать від товщини листа який сходить з форматного валу. Збільшення моменту на валу між моментом зрубу і сходу листа картону викликане переміщенням центру мас форматного валу

Щодо перехідного процесу на допоміжному валу який обертає транспортне полотно – на ньому чітко не виділяються моменти зрубу і сходу листа картону, так як основні збурення відбуваються у форматному валі який приводиться в рух головним приводом, але так як дані вали зв'язані одним полотном – перехідні процеси головного приводу мають вплив на допоміжний привод. Між зрубом та сходом лиса картону відмічається зниження моменту на валу двигуна. Це обумовлене тим що основним фактором який впливає на навантаження на даному двигуні являється маса картону на форматному валу, і при сходженні картону з валу – виконується розвантаження транспортувального полотна.

Розглянемо і проаналізуємо графіки пропорційності моменту на валу між головним та допоміжним двигуном ( $\frac{M_{гол}}{M_{доп}}$ ) у зв'язаній системі

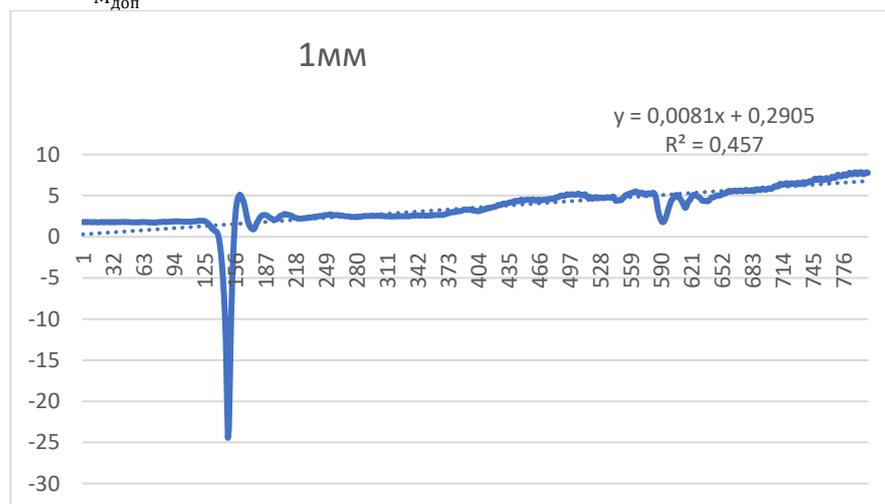


Рисунок 5 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{доп}$ ) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «1 мм»

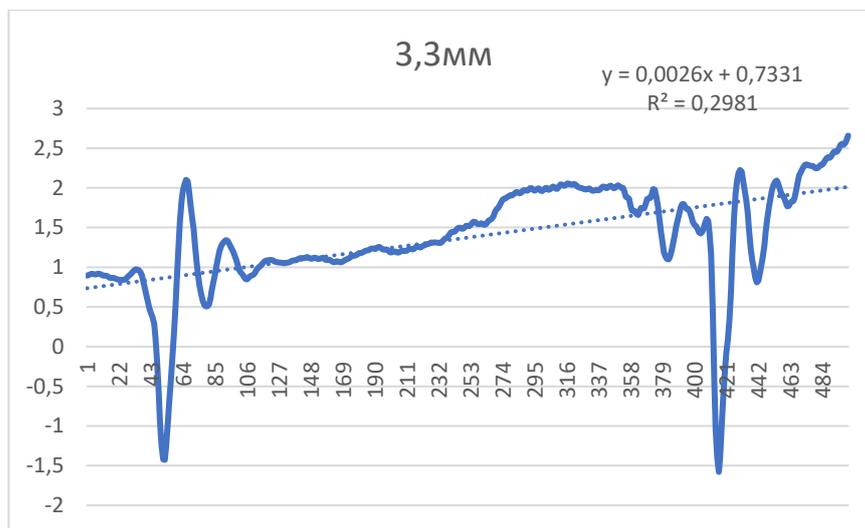


Рисунок 6 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{дон}$ ) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «3,3 мм»

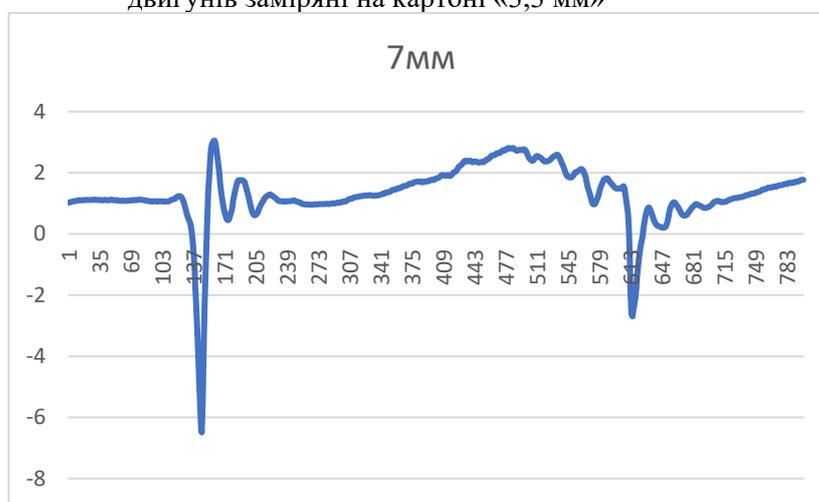


Рисунок 7 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{дон}$ ) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «7 мм»

Аналіз даних графіків показує що у випадку тонкого листа (рисунок 5) який забезпечує незначну зміну маси барабану ми бачимо чітко виділений момент зрубу, та сходу листа з валу (у вигляді реакцій на прижимні вали) який відрізняється від лінії тренду, а на інших етапах маємо кореляцію.

Розглянемо більш детально кореляцію моментів між головним і допоміжним двигуном на рисунку 8-10, де виділена частина процесу сходу намотаної папки картону з барабану для технологічних товщин 1мм, 3,3мм та 7мм відповідно.

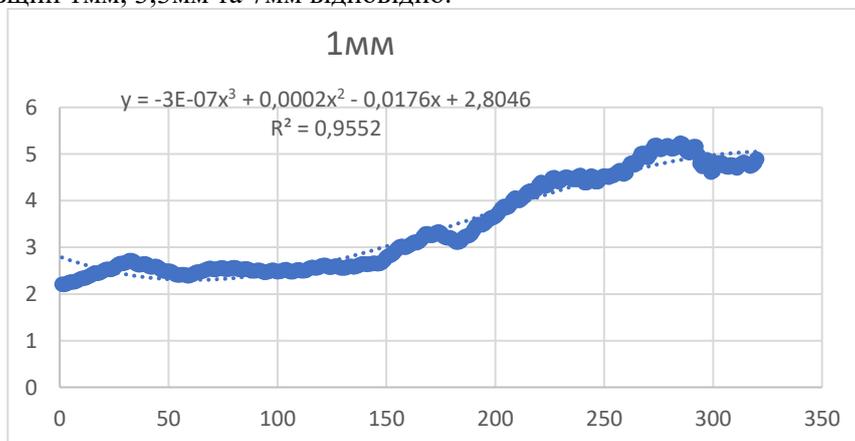


Рисунок 8 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{дон}$ ) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «1 мм»

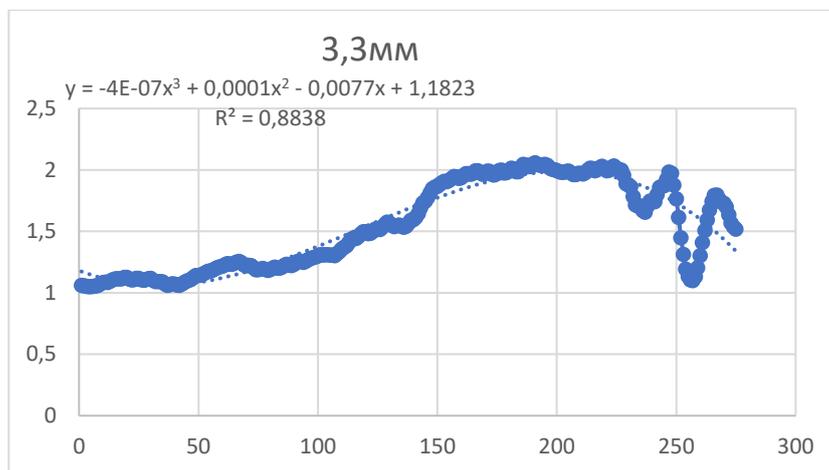


Рисунок 9 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{дон}$ ) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «3,3 мм»

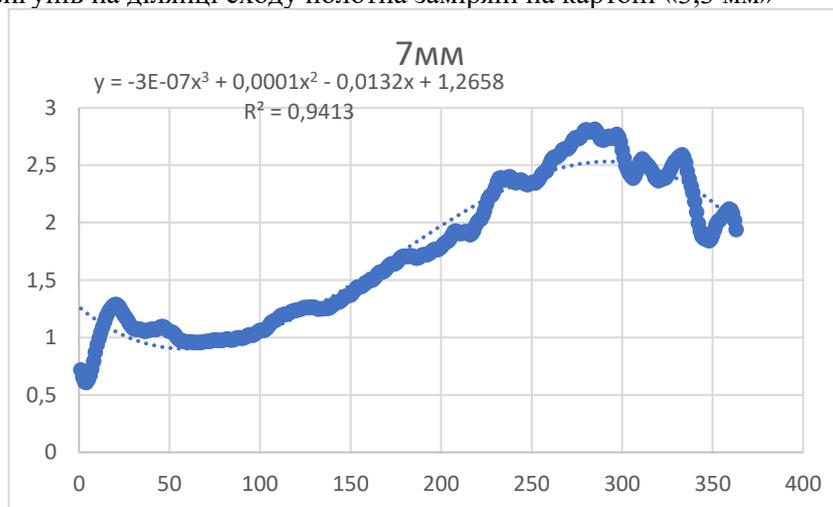


Рисунок 10 – Графік пропорційності моментів ( $M_{гол}/M_{дон}$ ) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «7 мм»

На даних графіках чітко видно що зміна моментів на валах двигунів має нелінійний характер і інтерполюється поліномом третьої степені з високим рівнем кореляції.

Для «1мм»:

$$y = -3 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0002 x^2 - 0,0176 x + 2,8046$$

Коефіцієнт кореляції:  $R^2 = 0,9552$

Для «3,3мм»:

$$y = -4 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0001 x^2 - 0,0077 x + 1,1823$$

Коефіцієнт кореляції:  $R^2 = 0,8838$

Для «7мм»:

$$y = -3 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0001 x^2 - 0,0132 x + 1,2658$$

Коефіцієнт кореляції:  $R^2 = 0,9413$

Такий графік має точку перегину в середній частині яка пояснюється зміною напрямку зміщення центра мас барабану під час скидання мокрої папки картону.

Експеримент показав, що стандартна система керування, орієнтована виключно на стабілізацію швидкості, є принципово неспроможною ефективно протидіяти параметричній нестійкості. Вона реагує на наслідки (відхилення швидкості), а не на першопричину (внутрішню динамічну нестабільність), генеруючи високочастотні коригувальні впливи, що можуть додатково навантажувати механіку [1]. Для надійної та безпечної роботи подібних систем необхідний перехід до більш досконалих, адаптивних алгоритмів керування. Перспективними напрямками є розробка систем, що в реальному часі ідентифікують змінні параметри (наприклад, поточний момент інерції) та проактивно застосовують керуючий вплив для активного демпфування коливань. Це вимагає застосування сучасних методів теорії керування, таких як Model Predictive Control (MPC) або адаптивне керування з ідентифікацією моделі.

**Висновки.** Проведене експериментальне дослідження перехідних процесів у системі механічно поєднаних валів карторобної машини «Doris» дозволило сформулювати наступні оновлені висновки.

1. Експериментально підтверджено критичний вплив зміни центру мас на динаміку системи. Аналіз даних вимірювання моментів для трьох марок картону («1мм», «3,3мм» та «7мм» відповідно масою 100 кг, 250 кг та 530 кг) однозначно продемонстрував, що збільшення ексцентриситету маси на форматному валу є домінуючим фактором, що визначає характер перехідних процесів. Для головного приводу це проявляється у зростанні амплітуди динамічних збурень, а для допоміжного — у зміні навантаження через перерозподіл маси.

2. Встановлено нелінійний характер взаємозв'язку між моментами приводів. Ключовим результатом дослідження є виявлення того, що хоча проста лінійна кореляція між моментами головного та допоміжного приводів погіршується зі збільшенням маси рулону, між ними існує стійкий, але складний нелінійний зв'язок. Під час процесу скидання рулону цей зв'язок успішно апроксимується поліномом третього ступеня з високою достовірністю. Наявність точки перегину на графіку цієї залежності фізично пояснюється зміною напрямку зміщення центру мас барабана, що підтверджує прямий вплив цього параметра на динаміку системи.

3. Інтерпретовано нелінійну динаміку, як прояв параметричної нестійкості. Періодична зміна моменту інерції системи «вал + рулон» діє як джерело енергії, що "накачує" коливання, перетворюючи керівні рівняння системи на лінійні з періодично змінними параметрами (ЛТР), для яких характерні зони нестійкості. Таким чином, виявлена нелінійна кореляція є експериментальною верифікацією фундаментальних положень теорії роторної динаміки на реальному промисловому обладнанні.

#### Інформаційні джерела

1. Gupta K. IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics [Електронний ресурс] / K. Gupta. Режим доступу: [https://archive.org/stream/K.\\_Gupta\\_IUTAM\\_Symposium\\_on\\_Emerging\\_Trends\\_in\\_Rotor\\_Dynamics\\_s/K.\\_Gupta\\_IUTAM\\_Symposium\\_on\\_Emerging\\_Trends\\_in\\_Rotor\\_Dynamics\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/K._Gupta_IUTAM_Symposium_on_Emerging_Trends_in_Rotor_Dynamics_s/K._Gupta_IUTAM_Symposium_on_Emerging_Trends_in_Rotor_Dynamics_djvu.txt) (дата звернення: 31.08.2025).

2. IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epdf.pub/iutam-symposium-on-emerging-trends-in-rotor-dynamics.html> (дата звернення: 31.08.2025).

3. Mechanisms and Machine Science [Електронний ресурс] // National Academic Digital Library of Ethiopia. Режим доступу: <https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/32219/1/71.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

4. Finite Element-Based Investigation of Rotor-Bearing-Stator Dynamics [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1934745/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

5. Основи теорії кіл. Ч. 2. Аналіз лінійних та нелінійних кіл в перехідному та усталеному режимі [Електронний ресурс] : навч. посіб. Харків : ХУПС. Режим доступу: [http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp\\_metod/3531/03\\_Navch\\_posibnik\\_Osnovi\\_teoriji\\_kil\\_ch\\_2\\_HUP\\_S.pdf](http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/3531/03_Navch_posibnik_Osnovi_teoriji_kil_ch_2_HUP_S.pdf) (дата звернення: 31.08.2025).

6. Kirk R. G., Gunter E. J. Transient Response of Rotor-Bearing Systems [Електронний ресурс] / R. G. Kirk, E. J. Gunter. Режим доступу: <https://dyrobes.com/wp-content/uploads/2012/12/Transient-Analysis-of-Rotor-Bearing-Systems-Kirk-Gunter-1973.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

7. Towards Determination of Critical Speeds of a Rotating Shaft with Eccentric Sleeves: Equations of Motion [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/282680141\\_Towards\\_Determination\\_of\\_Critical\\_Speeds\\_of\\_a\\_Rotating\\_Shaft\\_with\\_Eccentric\\_Sleeves\\_Equations\\_of\\_Motion](https://www.researchgate.net/publication/282680141_Towards_Determination_of_Critical_Speeds_of_a_Rotating_Shaft_with_Eccentric_Sleeves_Equations_of_Motion) (дата звернення: 31.08.2025).

8. Proceedings of the Surveillance 10, Vishno and AVE conferences [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://survishno.sciencesconf.org/data/pages/Monday\\_Proceedings\\_Survishno\\_2019.pdf](https://survishno.sciencesconf.org/data/pages/Monday_Proceedings_Survishno_2019.pdf) (дата звернення: 31.08.2025).

9. The coupled bending and torsional vibrations of the high-speed geared rotor-bearing system [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/289213895\\_The\\_coupled\\_bending\\_and\\_torsional\\_vibrations\\_of\\_the\\_high-speed\\_geared\\_rotor-bearing\\_system](https://www.researchgate.net/publication/289213895_The_coupled_bending_and_torsional_vibrations_of_the_high-speed_geared_rotor-bearing_system) (дата звернення: 31.08.2025).

10. Modal analysis of periodically time-varying linear rotor systems [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/229365668> Modal analysis of periodically time-varying linear rotor systems (дата звернення: 31.08.2025).
11. Cveticanin L. Dynamics of mass variable rotor and its application in modeling turning operation // *Mechanism and Machine Theory*. 2021. Vol. 155. Article 104082.
12. Chen Y., Wang J., Han Q. Dynamic characteristics of a dual-rotor system with inter-shaft bearing and rub-impact fault // *Measurement*. 2021. Vol. 174. Article 109033.
13. Fu C., Sinou J. J., Zhu W., Lu K. Transient response analysis of a misaligned coupled rotor system during start-up // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 473. Article 115228.
14. Guo Y., He Y., Li D. Vibration analysis of a cracked rotor system with time-varying mass // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 245. Article 108098.
15. He Y., Zhang Y., Yan X. Dynamic behavior of a coupled rotor-bearing system with misalignment and time-varying stiffness // *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 83. P. 136–154.
16. Li M., Yu L., Sun Y. Dynamic analysis of a twin-rotor system connected by a flexible coupling with angular misalignment // *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 2020. Article 8820673.
17. Liu J., Shao Y. Dynamic modeling and vibration analysis of a localized surface defect on a gear-rotor system with time-varying mesh stiffness // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 135. Article 106132.
18. Ma H., Wang X., Niu H. Vibration properties of dual-rotor systems under base excitation, mass unbalance and gravity // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 3. Article 960.
19. Słowik M. Dynamics of a mass variable drum winding a heavy rope // *Archive of Applied Mechanics*. 2021. Vol. 91. P. 819–834.
20. Wang N., Jiang D. Transient vibration analysis of a rotor system with sudden unbalance during acceleration // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 185. Article 109780.
21. Wang Z., Zhang W., Ma H. Nonlinear dynamics of a fluid-filled rotor system with time-varying mass // *Nonlinear Dynamics*. 2022. Vol. 108. P. 1957–1978.
22. Xiang L., Gao X., Hu A. Dynamic analysis of a variable-mass rotor system with rub-impact // *Journal of Vibration and Control*. 2021. Vol. 27, no. 11–12. P. 1325–1338.
23. Xu Z., Liu J., Zhou X. An investigation of vibrations of a flexible rotor system with the unbalanced force and time-varying bearing force // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. Article 25.
24. Yang Y., Cao S. Transient analysis of a winding machine rotor with time-dependent mass and stiffness // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. Vol. 38. P. 412–425.
25. Zhang J., Tang X., Zhang Q. Dynamic behavior analysis of the winding rotor with structural coupling and time-frequency varying parameters: Simulation and measurement // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. Article 8124.
26. Zhang K., Zhao C. Coupled lateral-torsional vibration of a rotor-bearing-gear system with time-varying mesh stiffness and backlash // *Mechanism and Machine Theory*. 2020. Vol. 154. Article 104044.
27. Zhang W., Chen L. Stability analysis of a rotor system with variable inertia moments and gyroscopic effects // *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87, no. 5. Article 051003.
28. Zhou H., Chen X. Transient response of a flexible coupling rotor system with misalignment faults during acceleration // *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 345–359.
29. Zhu H., Teo C. J. Flow-induced vibration of a variable mass rotor system: Modeling and analysis // *Journal of Fluids and Structures*. 2023. Vol. 116. Article 103803.
30. Cao S., Sun Y. Vibration characteristics of a coupled rotor-bearing system with rubbing fault during acceleration // *Tribology International*. 2024. Vol. 191. Article 109122.
31. Li H., Santos I. F. On the nonlinear dynamics of a rotor-bearing system with variable mass and active lubrication // *Journal of Sound and Vibration*. 2021. Vol. 501. Article 116045.
32. Gao P., Hou L. Nonlinear dynamic characteristics of a bolted joint rotor system with variable mass distribution // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2023. Vol. 170. Article 113346.

**Grabar I., Zhukovsky O.**  
Polissia National University

### **ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN A SYSTEM OF MECHANICALLY COUPLED SHAFTS WITH A VARIABLE CENTER OF MASS USING THE "DORIS" CARDBOARD MACHINE AS A CASE STUDY**

*The article investigates transient processes in an electromechanical system consisting of two mechanically coupled shafts with individual drives, where one shaft undergoes a significant periodic shift in its center of mass. The industrial transition to decentralized drives simplifies mechanical designs but complicates the dynamic interaction between components, particularly in the presence of variable inertial parameters. This can lead to parametric excitation and a loss of system stability. The aim of this work is the experimental analysis of the influence of the center of mass shift in one of the shafts on the system's dynamics and the torque proportionality coefficient of the main and auxiliary drives. The research methodology consists of measuring and analyzing the instantaneous torque values on the drive motor shafts of the "Doris" cardboard machine during the roll discharge technological cycle. The experiment was conducted using three different masses of wound cardboard: 100 kg, 250 kg, and 530 kg, which allowed for the assessment of system dynamics under varying degrees of eccentricity. The results showed that as the roll mass increases—and consequently, the center of mass shifts—the simple linear correlation between the torques of the main and auxiliary drives is lost. However, a detailed analysis of the roll discharge process revealed a complex yet stable nonlinear relationship, approximated by a third-degree polynomial with a high level of correlation. The graph of this dependence features a characteristic inflection point corresponding to the change in direction of the drum's center of mass displacement.*

*It has been established that significant periodic changes in the center of mass are a key destabilizing factor leading to parametric instability. The identified nonlinear nature of the torque relationship serves as empirical confirmation of this phenomenon. This demonstrates the fundamental insufficiency of standard control systems based on speed stabilization and justifies the need for developing adaptive algorithms capable of identifying variable system parameters and actively damping parametric oscillations.*

**Keywords:** *mechanically coupled shafts, transient processes, variable center of mass, rotor dynamics, parametric excitation, torque correlation, speed stabilization.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
08.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
10.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-6

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

## МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ БЛОКІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІТИКО-ЙМОВІРНІСНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

*У статті представлено методологію оцінювання точності блоків інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) на основі аналітико-ймовірнісного прогнозування. Розглянуто процеси, що відбуваються у функціональних блоках аналого-цифрових перетворювачів, та встановлено, що вони мають стохастичний характер і можуть призводити до метрологічних відмов у часі. Для мінімізації таких явищ запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміни метрологічних характеристик і ресурсного стану системи. На основі аналізу сучасних підходів виокремлено три основні методи прогнозування – аналітичний, статистичний і ймовірнісний – та обґрунтовано доцільність їх комбінування для підвищення достовірності прогнозів. Запропоновано математичний апарат аналітико-ймовірнісного прогнозування, що враховує зміну параметрів розподілу випадкових процесів у часі та дозволяє визначати ймовірність збереження роботоздатності вимірювальних блоків. Розроблена методологія сприяє підвищенню точності оцінювання стану ІВС, оптимізації процесів технічного контролю та забезпеченню метрологічної надійності програмно-визначуваних вимірювальних платформ.*

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальна система, аналітико-ймовірнісне прогнозування, феноменологічна модель, точність, метрологічна надійність, стохастичний процес.

**Постановка проблеми.** Сучасні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) є складними багатокомпонентними структурами, у яких точність та стабільність метрологічних характеристик визначають ефективність вимірювальних процесів і достовірність отриманих результатів. У функціональних блоках таких систем, зокрема в аналого-цифрових перетворювачах, відбуваються процеси, що мають стохастичний і необоротний характер. Це призводить до поступової деградації параметрів та можливих метрологічних відмов, які складно прогнозувати традиційними методами. Наявні підходи до оцінювання точності, засновані переважно на статичних або детермінованих моделях, не дозволяють адекватно врахувати часову мінливість процесів та вплив випадкових факторів. Тому виникає необхідність у розробленні методології оцінювання точності блоків ІВС, яка базується на поєднанні аналітичних і ймовірнісних методів прогнозування, що дасть змогу підвищити достовірність оцінки технічного стану та метрологічної надійності системи [1, 2].

**Проблема дослідження.** У процесі аналізу сучасних ІВС встановлено низку наукових і прикладних проблем, які ускладнюють забезпечення високої точності та стабільності їх функціонування. Однією з основних проблем є відсутність універсального підходу до опису стохастичних процесів, що визначають зміну метрологічних характеристик у часі. Процеси, які відбуваються у функціональних блоках ІВС, особливо в аналого-цифрових перетворювачах, мають випадковий і необоротний характер, що зумовлює складність їх математичного моделювання та прогнозування [2, 3].

Існуючі методи оцінювання точності здебільшого базуються на детермінованих або статичних моделях, які не враховують динамічну природу зміни параметрів та вплив випадкових факторів зовнішнього і внутрішнього середовища. Це призводить до зниження достовірності результатів оцінки та неможливості оперативного прогнозування метрологічних відмов у системі [4].

Другою важливою проблемою є необхідність створення адекватних феноменологічних моделей, які б дозволяли не лише описувати фізичну природу процесів у вимірювальних блоках, але й враховувати стохастичні закономірності їх розвитку. Такі моделі мають бути здатними відображати реальні зміни стану ІВС у часі, включно з деградаційними процесами та флуктуаціями параметрів, що впливають на точність вимірювань [5].

Ще однією проблемою є відсутність розвинутого математичного апарату аналітико-ймовірнісного прогнозування, який би дозволяв кількісно оцінювати ймовірність збереження роботоздатності системи, прогнозувати відхилення метрологічних параметрів та визначати моменти настання граничних станів. Без такого підходу неможливо забезпечити науково обґрунтоване прогнозування точності та надійності функціонування ІВС у реальному часі [6, 7].

Крім того, існує проблема інтеграції прогнозних методів у структуру програмно-визначуваних вимірювальних платформ, які сьогодні широко використовуються у складних вимірювальних комплексах. Необхідно розробити підходи, що дозволять реалізувати аналітико-ймовірнісні алгоритми оцінювання точності безпосередньо в апаратно-програмному середовищі вимірювальної системи, забезпечивши при цьому оптимальне співвідношення між швидкістю, обчислювальною складністю та метрологічною достовірністю результатів [8, 9].

Таким чином, розв'язання зазначених проблем вимагає розроблення єдиної методології оцінювання точності блоків ІВС на основі аналітико-ймовірнісного прогнозування, яка б поєднувала теоретичні засади математичної статистики, аналізу випадкових процесів і практичні методи прогнозування технічного стану вимірювальних систем. Це створить підґрунтя для підвищення метрологічної надійності, стабільності та ефективності сучасних інформаційно-вимірювальних платформ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінювання точності та надійності ІВС є однією з ключових проблем сучасної метрології та технічної діагностики. У наукових дослідженнях останніх років спостерігається тенденція до інтеграції класичних метрологічних методів із сучасними аналітико-ймовірнісними та програмно-аналітичними підходами. Це обумовлено розвитком програмно-визначуваних платформ, інтелектуальних сенсорних систем і технологій цифрових двійників, які вимагають нових засобів прогнозування метрологічних характеристик у реальному часі [1, 2].

Сучасні наукові праці зосереджені на розробленні стохастичних і феноменологічних моделей, які відображають часові зміни метрологічних параметрів вимірювальних блоків. Для опису процесів деградації та дрейфу параметрів активно застосовують марковські процеси, моделі випадкових функцій, стохастичні диференціальні рівняння та метод Монте-Карло. Такі підходи дозволяють не лише враховувати випадковий характер змін параметрів, але й визначати ймовірність виходу системи за допустимі межі точності протягом прогнозованого часу експлуатації [4, 5].

Важливе місце в сучасній метрології займають методи прогностичної аналітики (Prognostics and Health Management, PHM) та прогнозування залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL). Байєсівські алгоритми, фільтри Калмана, розширені та частинкові фільтри забезпечують можливість рекурсивної оцінки стану системи та прогнозування зміни метрологічних параметрів у динаміці. Окрім того, методи машинного навчання – регресійні моделі, ансамблеві алгоритми та глибокі нейронні мережі – активно застосовуються для оцінювання метрологічної стабільності й діагностики відмов на основі статистичних ознак і часових рядів [5, 6].

Досить поширеним напрямом є використання комбінованих моделей, у яких аналітичні фізичні описи процесів деградації поєднуються з ймовірнісними або емпіричними методами прогнозування. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність результатів і забезпечити адаптацію алгоритмів оцінювання точності до реальних умов експлуатації системи. Феноменологічні моделі, у свою чергу, дозволяють описати взаємозв'язок між структурними змінами елементів ІВС і відхиленнями метрологічних параметрів, враховуючи дію зовнішніх факторів, таких як температура, вібрації, електромагнітні завади тощо [8, 9].

Окрему увагу дослідники приділяють статистичним методам аналізу даних та моделюванням методом Монте-Карло, які дають змогу оцінювати густини розподілу похибок і невизначеності вимірювань. Це сприяє побудові прогнозних моделей точності, де кожен метрологічний параметр розглядається як випадкова величина зі змінними статистичними характеристиками – математичним сподіванням і дисперсією, що змінюються у часі [10, 11, 12].

Розвиток концепції програмно-визначуваних вимірювальних систем сприяв появі нових підходів до онлайн-калібровки та самодіагностики. Сучасні дослідження зосереджуються на інтеграції алгоритмів прогнозного оцінювання точності безпосередньо у програмні модулі вимірювальних платформ. Використання технології цифрових двійників (Digital Twin) дає змогу створювати віртуальні копії систем для імітації їх метрологічної поведінки та оптимізації режимів роботи в умовах змінних навантажень [13].

Попри значні досягнення, у науковій літературі залишаються невирішеними низка важливих питань. Зокрема, потребують подальшого розвитку методи кількісної оцінки невизначеності прогнозування метрологічних характеристик, а також стандартизовані методики валідації аналітико-ймовірнісних моделей точності. Недостатньо розробленими є алгоритми, орієнтовані на реалізацію у ресурсно-обмежених середовищах програмно-визначуваних систем, а також підходи до інтеграції фізично обґрунтованих моделей із методами машинного навчання [6, 10, 13].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про актуальність подальшої розробки методології аналітико-ймовірнісного прогнозування точності блоків інформаційно-вимірювальних систем. Це дозволить не лише підвищити достовірність оцінювання метрологічних характеристик, але й створити основу для побудови інтелектуальних систем контролю, здатних до самодіагностики, адаптації та прогнозного управління точністю у процесі експлуатації.

**Мета роботи** є розроблення та обґрунтування методології оцінювання точності блоків інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) на основі аналітико-ймовірнісного прогнозування, що забезпечує підвищення достовірності оцінки технічного стану та метрологічних характеристик функціональних елементів системи. Для досягнення цієї мети передбачено дослідження феноменологічних моделей зміни метрологічних характеристик у часі, визначення закономірностей стохастичних процесів, які відображають деградаційні зміни параметрів ІВС, а також формування математичного апарату, який поєднує аналітичні та імовірнісні методи прогнозування для оцінювання точності та прогнозу метрологічної надійності програмно-визначуваних вимірювальних платформ.

**Викладення основного матеріалу.** У сучасних дослідженнях встановлено, що процеси, які відбуваються у функціональних блоках аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що є складовими ІВС, не завжди мають оборотний характер. Як наслідок, динаміка таких процесів характеризується значними часовими інтервалами, що ускладнює оперативне визначення поточного стану та змін метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки. Для мінімізації впливу подібних явищ доцільним є застосування феноменологічних моделей, які забезпечують можливість побудови характеристик стану засобів вимірювань та проведення їх оцінювання на основі положень теорії випадкових процесів. Такі моделі дозволяють описати не лише детерміновані зміни параметрів, але й стохастичні коливання, що відображають реальні процеси функціонування систем у часі.

Під час визначення стану ІВС широко використовуються різні типи феноменологічних моделей, орієнтовані на опис процесів у режимі реального часу. У ряді наукових праць [1, 2, 4-7] показано, що зміна стану вимірювальних засобів у часі може бути подана у вигляді ймовірнісного або стохастичного процесу. При цьому характеристики такого процесу – математичне сподівання, дисперсія та кореляційні функції – визначають еволюцію метрологічних параметрів у часі та дають можливість оцінити ймовірність збереження роботоздатності системи. Вигляд типового стохастичного процесу, що описує зміну стану засобів вимірювань у часі, наведено на рисунку 1.

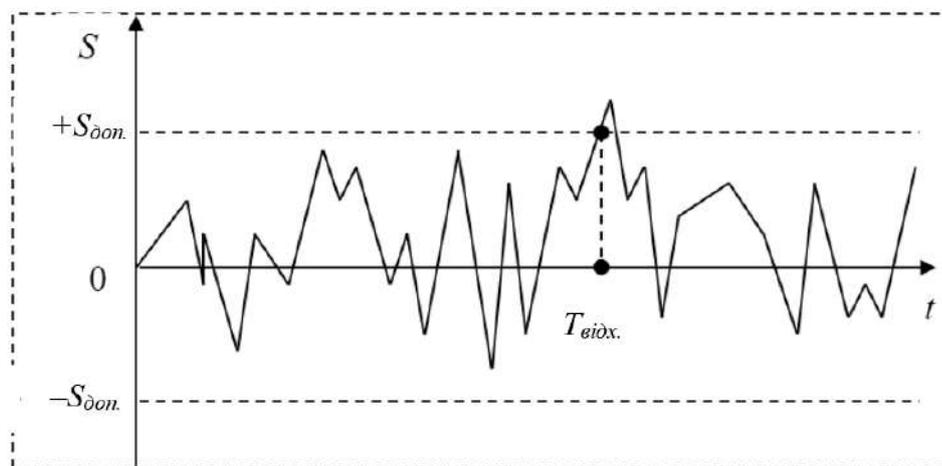


Рисунок 1 – Стохастичний процес зміни у часі стану метрологічних характеристик

Під час розв'язання задачі щодо визначення залежності між залежними та незалежними змінними ресурсний стан програмно-визначуваної платформи, зокрема її функціонального блока – АЦП, зберігається доти, доки миттєве значення стану  $S(t)$  не виходить за межі встановлених граничних значень метрологічних характеристик. Іншими словами, система перебуває у роботоздатному стані, поки  $S(t) \in [-S_{\text{дон}}, S_{\text{дон}}]$ .

У випадку, коли випадковий процес, що описує зміну стану АЦП у часі, перетинає одну з меж інтервалу при  $t = t_{\text{відх}}$ , цей момент фіксується як метрологічна відмова (рис. 1). Такий підхід дозволяє інтерпретувати процес деградації або відхилення метрологічних параметрів як стохастичний процес із ймовірнісною оцінкою моменту втрати роботоздатності.

Однією із типів феноменологічних моделей, придатних для опису зміни ресурсного стану вимірювальних систем у часі, є модель, наведена на рисунку 2. Вона може бути застосована не лише до окремих функціональних елементів програмно-визначуваних платформ, таких як АЦП, але й для опису загального стану всієї вимірювальної платформи.

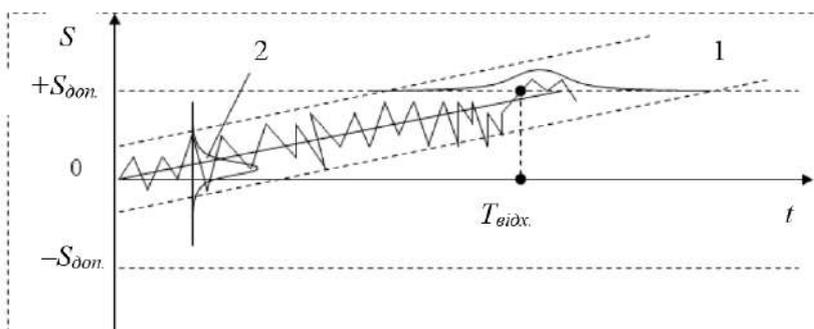


Рисунок 2 – Феноменологічна модель зміни у часі метрологічних характеристик

Такі моделі дозволяють врахувати часову динаміку змін параметрів, вплив випадкових збурень, а також ймовірнісний характер процесів старіння та деградації елементів. Використання подібного підходу створює підґрунтя для побудови методів аналітико-ймовірнісного прогнозування точності та надійності блоків ІВС у режимі реального часу.

Клас завдань, пов'язаний із забезпеченням стабільності метрологічних характеристик програмно-визначуваних вимірювальних платформ у процесах їх розробки та експлуатації, може бути розглянутий як прогнозована величина, що описує ресурсну характеристику системи та її поточний ресурсний стан. Визначення такого стану є ключовим елементом при оцінюванні точності функціональних блоків, зокрема АЦП, та забезпеченні їх метрологічної надійності.

Зазначений клас завдань вирішується за допомогою комплексу методів, заснованих на прогнозуванні характеристик платформи, що дозволяють передбачати зміни параметрів, які виникають унаслідок вимірювальних процедур, як у вигляді результатів спостереження фізичних процесів, так і у формі аналітичних залежностей.

У наукових джерелах, присвячених питанням прогнозування технічного стану та ресурсу елементів вимірювальних систем [1-7], наведено різні методи та підходи, які систематизовано відповідно до їх принципів і цілей. Одним із ефективних напрямів є методологія, описана у [13], яка ґрунтується на диференціації методів прогнозування за певними ознаками. Згідно з цим підходом, виділяють такі основні групи методів:

- визначення параметрів, що підлягають дослідженню впродовж певного інтервалу часу;
- зіставлення отриманих результатів прогнозування із заздалегідь визначеними класами за критеріями надійності;
- представлення результатів прогнозування у вигляді значень ресурсних станів із урахуванням граничних обмежень.

Узагальнюючи викладене, можна визначити три основні групи методів, що використовуються для прогнозування стану ресурсів програмно-визначуваних вимірювальних платформ:

- аналітичне прогнозування, що базується на математичному описі процесів і побудові функціональних залежностей;
- статистична класифікація, яка враховує розподіл параметрів за класами станів;
- ймовірнісне прогнозування, спрямоване на оцінювання ймовірності збереження роботоздатності системи в часі.

Оцінювання можливостей кожного з цих методів з позицій їх застосування для вирішення завдань прогнозування стану метрологічних характеристик програмно-визначуваних вимірювальних платформ є важливим етапом формування узагальненої методології аналітико-ймовірнісного прогнозування точності блоків ІВС.

Метод прогнозування складається з наступного підходу. Є якийсь процес, що визначає стан об'єкта у вигляді об'єктивної функції, являє собою  $n$ -вимірний гаусовий розподіл, який можна записати в наступному вигляді:  $\vec{\xi}(t) = \{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)\}$ , який можна спостерігати як у вигляді дискрети або безперервно, у визначені тимчасові інтервали  $t_0 = 0$  до  $t_q \in T_1$ , коли вона може набувати наступних значень  $\vec{\xi}(t_0), \vec{\xi}(t_1), \dots, \vec{\xi}(t_q)$  у задані моменти часу  $t_0, t_1, \dots, t_q$ . За відомими значеннями  $\vec{\xi}(t_j)$ ,  $j = 0, 1, \dots, q$  визначимо параметри функції  $\vec{\eta}(t_{q+1}), \vec{\eta}(t_{q+r}), \dots, \vec{\eta}(t_{q+m})$  у задані інтервали часу  $t_{q+1}, t_{q+r}, \dots, t_{q+m} \in T_2$ , де  $T_2$  – деяка область прогнозованих моментів часу. Вирішення завдання буде зводитися до знаходження деякого оператора  $W$ , який встановлює зв'язок між контролюючими параметрами та прогнозованими:

$$\vec{\xi}(t_{q+r}) = W \left\{ \vec{\xi}(t_j) \right\}, \quad (1)$$

де  $r = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, q$ .

Методи аналітичного прогнозування використовуються для прогнозування як одновимірних, так і багатовимірних детермінованих процесів. У першому випадку завдання прогнозування полягає у побудові інтерполяційного виразу, що визначає залежність досліджуваного процесу від часу управління, та в екстраполяції отриманого виразу у області прогнозування. У другому варіанті набір параметрів  $\{\xi_1, \dots, \xi_l\}$  характеризуватиме стан об'єкта, який може бути представлений у вигляді вектора в  $l$ -мірному просторі. Положення цього вектора визначить певний рівень роботоздатності об'єкта. Таким чином, виникає проблема, що полягає в попередньому періодичному контролі параметрів,  $\xi_1(t), \dots, \xi_l(t)$ , визначення у моменти

контролю значень функції стану  $S \left[ \vec{\xi}(t) \right] = S \left[ \xi_1(t), \dots, \xi_l(t) \right]$  та розрахунку за відомими

значеннями функції стану  $S \left[ \vec{\xi}(t_d) \right]$ ,  $t_d \in T_1$ ,  $d = 0, 1, \dots, q$  її значень у області прогнозування

$S \left[ \vec{\xi}(t_{q+e}) \right]$ ,  $t_{q+e} \in T_2$ ,  $e = 1, 2, \dots, m$ .

Для розгляду складних процесів, що мають випадковий характер, можливе застосування наступного методу, особливістю якого є використання узагальненого показника, який характеризується якоюсь багатовимірною компонентою, яку у свою чергу можна описати використовуючи подання одновимірних компонентів, які залежать від параметрів, що визначаються програмно-визначувальними засобами вимірювань. Для складних випадкових процесів можливе застосування методу так званого узагальненого параметра, суть якого полягає в тому, що якийсь процес, який може бути охарактеризований багатовимірними компонентними складовими можна описати якоюсь функцією, що представляє одновимірний масив, який залежить від реєстрованих параметрів вимірювального засобу. Ця інтегральна функція являє собою деякий набір аналітичних виразів, які були заздалегідь визначені. Таким чином, завдання прогнозування зводиться саме до прогнозування даної узагальненої чи одновимірної моделі.

Застосування цього методу не дозволяє використовувати його в повному обсязі, оскільки він має ряд обмежень, пов'язаних із застосуванням його тільки для найпростіших об'єктів.

Для вирішення завдань прогнозування у системах, побудованих на основі програмно-визначуваних платформ, необхідно використовувати модернізовані феноменологічні моделі, які не лише здійснюють відображення вимірювального засобу в процес вимірювання, а також здійснюють початкову або попередню фільтрацію, які ґрунтуються на методах математичної статистики. У загальному випадку компонента феноменологічної моделі, що забезпечує фільтрацію за заданими алгоритмами, це, як правило, деяка передавальна система або

передавальна структура, яка виконує відповідно до критеріїв оптимальності функцію фільтрації сигналів у перешкоді. Один із варіантів реалізації такої фільтрації це використання величини середньоквадратичної похибки, представленої у вигляді деякого рекурсивного запису, який придатний при реалізації цього алгоритму інтегрованого в структуру моделі.

Ці розглянуті методи прогнозування можна використовувати тільки для тих процесів, результат яких може бути визначено певними значеннями вхідних та вихідних змінних та станом системи.

Завдання прогнозування з наведеними вище підходами можна сформулювати наступним чином. Нехай у момент  $t_0$  або в обмежений початковий період часу отримано значення параметрів контрольованого процесу  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l$ , що характеризують функцію  $S\left(\vec{\xi}\right)$ . Необхідно

за сукупністю параметрів – координат векторної функції  $S\left(\vec{\xi}\right)$  ухвалити рішення про належність досліджуваного процесу до того чи іншого класу  $Z^w$ ,  $w = 1, 2, \dots, k$ , де  $Z^w$  можуть бути параметричними або тимчасовими. Набір та розмір класів визначаються специфічними характеристиками діагностичних об'єктів Вони об'єднують об'єкти, що характеризуються ідентичністю індикаторів стану, набором властивостей тощо.

Класи  $Z^w$  – це свого роду стандарти чи еталони, які часто виражаються у вигляді еталонних «образів». Завдання полягає у порівнянні «образу» вивченого об'єкта з вихідним (еталонним), а потім до прийняття рішення. Проблеми такого роду вирішуються або методами статистичної класифікації, чи методами теорії розпізнавання «образів».

Застосування цього методу під час вирішення завдань пов'язаних з прогнозуванням полягає у виборі системних характеристик з наступною їх класифікацією. Розглянуті характеристики описаної групи можуть бути застосовані тільки для тих завдань, які мають індивідуальний характер при визначенні стану об'єкта та її ресурсу.

Більшість складних об'єктів чи складних систем, зокрема програмно-визначуваної або програмно-конфігурованої платформи та засобів вимірювань, побудованих на цих платформах, мають у своїй структурі множини різних протікаючих складних процесів, які при описі або ідентифікації являють собою певний набір випадкових процесів та для їх вирішення необхідно використовувати ті методи, які можуть забезпечити ймовірнісне прогнозування цих процесів.

Розв'язання такого завдання можна подати у такому вигляді. Нехай отримано значення параметрів  $\xi_1(t), \dots, \xi_l(t)$  у моменти часу  $t_g$ ,  $g = 0, 1, \dots, q$  і в кожному тимчасовому перерізі стан об'єкта повністю характеризується функцією розподілу  $Q_g\left(\vec{\xi}\right)$ . За відомими значеннями

$\vec{\xi}(t_g)$ ,  $Q_g\left(\vec{\xi}\right)$  необхідно обчислити ймовірність збереження роботоздатності об'єктом:

$$Q_{q+c}\left(\vec{\xi}^*\right) = K \left\{ \vec{\xi}(t_{q+c}) < \vec{\xi}^* \right\} = \int_{-\infty}^{\xi^*} p_{t_{q+c}}\left(\vec{\xi}\right) d\vec{\xi}, \quad (2)$$

де  $\vec{\xi}^*$  – допустиме значення функції  $\xi(t)$ ;

$p_{t_{q+c}}$  – густина розподілу значень  $\xi(t)$  для значень часу  $t_{q+c}$ ,  $c = 1, 2, \dots, m$  з математичним очікуванням  $m_{\vec{\xi}}$  та дисперсією  $\sigma_{\vec{\xi}}^2$ .

Проблема ймовірнісного прогнозування одновимірних процесів становить найбільший інтерес. Знаючи зміну густини розподілу  $p(\xi)$  або пов'язані з ним статистичні характеристики дослідженого параметра  $\xi(t)$  за часом, можна визначити ймовірність виходу (невиходу) за допустимі межі у майбутні моменти часу.

Методи прогнозування випадкових процесів із нормальною функцією розподілу добре розроблені для практичного використання. Це пов'язано з тим, що процеси поступової зміни, деградації параметрів більшості технічних об'єктів характеризуються нормальною густиною розподілу випадкових функцій у кожному перерізі часу.

Нормальна густина розподілу визначається за формулою (3):

$$p_{t_g}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi(t_g)} \cdot \exp\left\{-\frac{[\xi - m_\xi(t_g)]^2}{2\sigma_\xi^2(t_g)}\right\} \quad (3)$$

Вона описана математичним очікуванням досліджуваної випадкової змінної  $m_\xi(t_g)$  та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_\xi(t_g)$  у кожному відрізку часу  $t_i$ , які через дрейф часу параметра також є функціями часу, що призводить до зміни густини розподілу в часі  $p[\xi(t)]$ . Далі, за відомою густиною розподілу в різні моменти часу ймовірність виходу (або не виходу) параметра, що вивчається для встановлених меж може бути визначено.

Статистичні характеристики  $m_\xi$  та  $\sigma_\xi$  обчислюються на основі даних за окремими реалізаціями досліджуваного процесу в різних тимчасових перерізах. Вивчення поведінки у часі параметрів функції розподілу  $m_\xi$  та  $\sigma_\xi$  дозволяє апроксимувати їх різними залежностями, такими як лінійна, експоненційна, логарифмічна, поліноміальні, і, зрештою, здійснити екстраполяцію їх на область прогнозування. Таким чином, прогнозування ймовірнісних характеристик досліджуваного параметра  $\xi$  полягає у прогнозуванні аналітичними методами характеристик  $m_\xi$  та  $\sigma_\xi$  на область прогнозування  $T_2$  та обчисленні за знайденими  $m_\xi(t_{q+c})$  та  $\sigma_\xi(t_{q+c})$  ймовірностей виходу (невиходу) досліджуваного процесу за допуск:

$$K\{\xi(t_{q+c}) < \xi^*\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi(t_{q+c})} \int_{-\infty}^{\xi^*} \exp\left\{-\frac{[\xi - m_\xi(t_{q+c})]^2}{2\sigma_\xi^2(t_{q+c})}\right\} d\xi. \quad (4)$$

Метод статистичного моделювання дозволяє вирішувати дуже складні завдання і має суттєві переваги перед аналітичними методами [13]. Він дозволяє повніше врахувати особливості функціонування складної системи, використовувати будь-які закони розподілу випадкових величин, має наочне ймовірнісне трактування, просту обчислювальну схему, можливість значно збільшити точність методу за допомогою збільшення кількості моделюваних реалізацій випадкового процесу і має широке поширення під час вирішення різних прикладних завдань. Таким чином, ймовірнісне прогнозування полягає у визначенні ймовірнісних характеристик апостеріорних випадкових процесів зміни випадкових параметрів, тобто процесів, що є продовженнями відрізків реалізацій, отриманих шляхом індивідуального контролю, моделювання цих процесів. Аналізуючи розглянуті групи методів із позицій використання їх при вирішенні задачі прогнозування стану метрологічних характеристик ІВС, можна зробити висновок про можливість застосування для розглянутої задачі методів ймовірнісного прогнозування з елементами аналітичного прогнозування, тобто застосування математичного апарату аналітико-ймовірнісного прогнозування технічного стану різних об'єктів.

**Висновки.** Проведений аналіз показав, що процеси у функціональних блоках ІВС, зокрема АЦП, мають стохастичний характер, що потребує застосування методів ймовірнісного аналізу для оцінювання точності та прогнозування метрологічних характеристик. Запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміну стану вимірювальних засобів у часі та враховують як аналітичні, так і статистичні залежності між параметрами. Обґрунтовано доцільність застосування аналітико-ймовірнісного підходу до прогнозування стану ІВС, який поєднує точність математичного аналізу з гнучкістю статистичного моделювання стохастичних процесів.

Розроблена методологія дає можливість підвищити достовірність оцінювання точності блоків ІВС, скоротити ризики метрологічних відмов та забезпечити стабільність роботи програмно-визначуваних вимірювальних платформ у реальному часі. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та експлуатації сучасних ІВС для побудови систем автоматичного контролю точності та прогнозування метрологічної надійності їх компонентів.

#### Інформаційні джерела

1. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А., Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

2. Яцук В. О., Бубела Т. З., Микийчук М. М., Походило Є. В. Забезпечення метрологічної надійності в розпорощених вимірювальних системах. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. Т. 79, Вип. 3. С. 71-82.

3. Денисюк В. Ю., Проблеми забезпечення точності та метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матер. XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 14-15 трав. 2024 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 345-348.
4. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Інформаційно-вимірювальні технології та системи: навч. посіб. Харків: «Факт», 2023. 254 с.
5. Дубовий В. М. Кветний Р. Н., Михальов О. І. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. 804 с.
6. Кондрашов С. І., Гусельников В. К., Медведєва Л. О. Інформаційні технології проектування вимірювальних перетворювачів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2008. 288 с.
7. Денисюк В. Ю. Оцінка метрологічної надійності аналого-цифрового блоку перетворювача інформаційно-вимірювальних систем на етапі його проектування. *«Приладобудування: стан і перспективи»*: зб. матер. XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 13-14 трав. 2025 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025, С. 419-421.
8. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Вступ в теорію систем. Харків: «Факт», 2021. 202 с.
9. Oba Z. M., Kabiru L. Fabrication of microcontroller based speed detection and measurement system. *Journal of Engineering and Earth Sciences* 15(1), 2022, P. 140-150.
10. Кондрашов С. І., Чинков В. М., Харченко О. Л. Невизначеність вимірювання: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2010. 80 с.
11. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. *Збірник статей «Перспективні технології та прилади»*. 2020. Вип. 16. С. 38-47. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16>
12. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. *Збірник статей «Перспективні технології та прилади»*. 2020. Вип. 17. С. 33-41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-5>
13. Григоренко І. В. Багатопараметричний контроль якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення з урахуванням факторних впливів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. Харків, 2024. 390 с.

## Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

### METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ACCURACY OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS BLOCKS BASED ON ANALYTICAL-PROBABILISTIC FORECASTING

*The article presents a methodology for assessing the accuracy of blocks of information and measuring systems (IMS) based on analytical and probabilistic forecasting. The processes occurring in the functional blocks of analog-to-digital converters are considered, and it is established that they are stochastic in nature and can lead to metrological failures over time. To minimize such phenomena, the use of phenomenological models is proposed, which allow describing changes in metrological characteristics and the resource state of the system. Based on the analysis of modern approaches, three main forecasting methods are distinguished - analytical, statistical and probabilistic - and the expediency of combining them to increase the reliability of forecasts is substantiated. A mathematical apparatus for analytical and probabilistic forecasting is proposed, which takes into account the change in the parameters of the distribution of random processes over time and allows determining the probability of maintaining the operability of measuring blocks. The developed methodology contributes to increasing the accuracy of assessing the state of the IMS, optimizing technical control processes and ensuring metrological reliability of software-defined measuring platforms.*

**Keywords:** information and measurement system, analytical and probabilistic forecasting, phenomenological model, accuracy, metrological reliability, stochastic process.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
25.09.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
23.12.2025 р.

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-7

Євсюк М. М., Якимчук Н. М., Стаднюк А. Ю.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ ZABBIX

*У роботі розглянуто процес інтеграції оптичних терміналів у систему моніторингу мережі на базі платформи Zabbix. Наведено детальний алгоритм впровадження системи моніторингу Zabbix, який включає встановлення та налаштування сервера, інсталяцію агентів, створення шаблонів моніторингу, додавання обладнання, проведення тестування та конфігурацію інформаційних сповіщень. Особливу увагу приділено аналізу процесів збору, обробки та візуалізації даних, що дозволяє забезпечити надійний контроль мережевої інфраструктури та своєчасне виявлення критичних станів.*

*Результати дослідження підтверджують доцільність використання Zabbix для комплексного моніторингу оптичних мереж, оскільки система забезпечує високий рівень автоматизації, гнучкість налаштувань і можливість адаптації до змін у технічному середовищі. Отримані висновки можуть бути використані під час проєктування, експлуатації та модернізації оптичних мереж зв'язку.*

**Ключові слова:** оптичні мережі, оптичні термінали, моніторинг мережі, Zabbix.

**Постановка проблеми.** Моніторинг телекомунікаційних оптичних мереж є ключовим процесом для забезпечення їх стабільної роботи та ефективності, особливо у сучасному світі, що динамічно розвивається. Завдяки цьому підходу можна вчасно виявляти пошкодження й оперативно на них реагувати, що сприяє попередженню збоїв і забезпечує постійний доступ до мережевих послуг.

Важливим аспектом моніторингу є оптимальне використання ресурсів. Аналізуючи стан пропускної здатності, завантаження обладнання та обчислювальні потужності, можна значно підвищити ефективність їх використання, одночасно знижуючи витрати на обладнання та енергоспоживання [1].

Ще один важливий напрям – це підвищення кібербезпеки. Моніторинг дає змогу вчасно виявляти підозрілі активності в мережевому трафіку, які можуть свідчити про спроби атак або несанкціонованого доступу. Такий підхід значно зміцнює захист інфраструктури.

Якість обслуговування (QoS) є ключовим фактором у мережах, які забезпечують сервіси в реальному часі. Постійний моніторинг таких параметрів, як швидкість передачі даних, затримка та втрата пакетів, дозволяє підтримувати стабільність роботи мережі й гарантувати високий рівень обслуговування [1].

Отримані в процесі моніторингу дані допомагають ефективно планувати розвиток мережі. На основі аналізу навантаження та тенденцій можна визначити оптимальні шляхи для масштабування інфраструктури, планування інвестицій та запобігання перевантаженням у майбутньому.

Моніторинг також автоматизує діагностику та усуває проблеми ще на ранніх етапах, що суттєво знижує витрати на технічне обслуговування та час простоїв. Це позитивно впливає на продуктивність персоналу та загальну ефективність роботи мережі [1, 2].

Впровадження сучасних технологій потребує чіткого розуміння поточного стану інфраструктури, і моніторинг стає базовим інструментом для збору аналітичних даних. Ці дані є основою для розробки нових рішень і підтримки інноваційних проєктів

Отже, моніторинг телекомунікаційних оптичних в тому числі і пасивних мереж є невід'ємним інструментом для забезпечення їхньої надійності, захищеності та адаптивності до змін. Він дозволяє зберігати стабільність мережі та реагувати на виклики сучасного інформаційного середовища.

**Аналіз останніх досліджень.** Процес моніторингу та аналізу мережевої роботи складається з двох основних етапів: збору первинних даних про стан мережі та їх подальшого аналізу з метою виявлення потенційних проблем.

Одним із ключових завдань моніторингу є своєчасне усунення несправностей за допомогою спеціалізованого програмного й апаратного забезпечення, аналізаторів та тестерів. У

цьому процесі активно застосовуються складні експертні системи, які акумулюють практичний досвід і знання фахівців.

Відповідно до рекомендацій ISO, основні функції систем управління мережею включають:

- управління конфігурацією, що забезпечує налаштування і підтримку структури мережі;
- обробку помилок, яка дозволяє ідентифікувати, локалізувати та усувати проблеми;
- аналіз продуктивності, що спрямований на оцінку ефективності роботи мережі та її пристроїв;

– забезпечення безпеки, яке охоплює контроль доступу, збереження цілісності даних і запобігання несанкціонованим діям або витокам інформації [2].

Завдяки цим функціям мережевий моніторинг сприяє забезпеченню стабільної та безпечної роботи інфраструктури, мінімізуючи ризики простоїв та підвищуючи надійність передачі даних.

Мережеві пристрої, такі як хаби й комутатори, відіграють ключову роль у процесах моніторингу. Хаби передають пакети на всі підключені порти, забезпечуючи базову функціональність. У свою чергу, комутатори аналізують MAC-адреси і спрямовують пакети лише на відповідний порт, що сприяє оптимізації роботи мережі та зниженню зайвого навантаження.

В [3] авторами розглянуто особливості взаємозв'язку між технічним обслуговуванням оптичних мереж та системами управління безпекою в мережах PON. Проаналізовано зміну вимог до ефективності моніторингу та безперебійної роботи інфраструктури. На основі дослідження аномалій, спричинених як умисними, так і випадковими пошкодженнями в мережах PON, запропоновано когнітивний алгоритм моніторингу, що поєднує спектральний аналіз оптичних сигналів із методами машинного навчання. Такий підхід підвищує деталізацію діагностики волоконно-оптичної інфраструктури, зменшує вплив слабозатухаючих мод та забезпечує прогнозування деградації оптичного волокна в режимі реального часу.

Отже можна константувати, що мережевий моніторинг дозволяє своєчасно виявити проблеми та підтримувати стабільну роботу мережі шляхом аналізу пропускної здатності, затримок, втрат пакетів та інших ключових параметрів. Застосування принципів моніторингу забезпечує прозорість і ефективність її функціонування.

Однією із платформ для моніторингу телекомунікаційної мережі є Zabbix. Він підтримує два основних методи моніторингу: агентний, при якому спеціалізований агент, встановлений на пристроях, збирає дані про їх продуктивність, і безагентний, який використовується для пристроїв, що не підтримують агентів, або для здійснення простих перевірок, таких як перевірка доступності служб через SNMP [4].

**Мета роботи.** Опрацювання алгоритму роботи системи моніторингу оптичної мережі на базі платформи Zabbix, що передбачає дослідження технічних характеристик оптичних терміналів, аналіз їхньої взаємодії з моніторинговою системою, налаштування протоколів збору даних (зокрема SNMP), створення шаблонів моніторингу, інтеграцію мережевого обладнання до системи.

**Виклад основного матеріалу.** Оптичні термінали в мережевій інфраструктурі дозволяють передавати значні обсяги даних на великих швидкостях і відстанях. Вони є основним елементом оптичних мереж, забезпечуючи зв'язок між волоконно-оптичними лініями та іншими компонентами мережі. Інтеграція оптичних терміналів із системою моніторингу Zabbix, вимагає глибокого розуміння технічних параметрів обладнання та особливостей його взаємодії з моніторинговою платформою.

«Zabbix дозволяє моніторити різноманітні мережеві компоненти, включаючи маршрутизатори, комутатори, сервери, а також забезпечує підтримку віртуалізації через VMware. Віртуальні машини та гіпервізори можуть бути моніторені з використанням спеціальних низькорівневих правил виявлення, що дає змогу детально відслідковувати стан віртуалізованої інфраструктури» [4].

Оцінка взаємодії з оптичними терміналами є важливим компонентом системи моніторингу оптичної мережі, особливо при інтеграції з такими платформами, як Zabbix. Необхідно провести детальний аналіз можливостей терміналів оптичної мережі, враховувати такі характеристики, як швидкість передачі даних, типи підтримуваних оптичних інтерфейсів, сумісність із протоколами, зокрема SNMP, а також здатність до масштабування для задоволення зростаючих потреб мережі

Реалізація та перевірка роботи системи моніторингу Zabbix в оптичних мережах є ключовим етапом для забезпечення надійного контролю стану мережевої інфраструктури. Для цього необхідно ретельно підготувати план дій і виконати низку важливих завдань дотримуючись визначеного алгоритму (рисунок 1) [4].



Рисунок 1 – Алгоритм роботи системи моніторингу на базі Zabbix

Отже, системи моніторингу Zabbix для обладнання оптичної мережі є багатоетапним процесом, який потребує ретельного планування та точного виконання, щоб забезпечити стабільну й ефективну роботу засобів контролю. Це включає налаштування протоколів зв'язку, зокрема SNMP (Simple Network Management Protocol, дозволяє адміністраторам керувати мережевими пристроями та моніторити їх стан), для отримання даних про робочий стан і продуктивність пристроїв. Охарактеризуємо детальніше основні етапи налаштування Zabbix для моніторинг оптичних мереж.

На початковому етапі визначаються технічні характеристики обладнання оптичної мережі, яке потребує моніторингу: контроль ресурсів (процесор, пам'ять, дисковий простір), аналіз мережевого трафіку, а також відстеження стану сервісів. Паралельно проводиться збір технічної інформації про обладнання, включаючи специфікації та поточні налаштування.

1. Встановлення та налаштування Zabbix Server. Сервер Zabbix розміщується на платформі, що відповідає вимогам щодо обробки значних обсягів даних. Обирається апаратна або віртуальна платформа для сервера Zabbix, враховуючи вимоги щодо продуктивності та можливості масштабування. Після встановлення проводиться конфігурація бази даних і ключових параметрів сервера, що забезпечує надійну та безперебійну роботу системи.

2. Інсталяція Zabbix Agent. Для встановлення стабільного зв'язку між сервером Zabbix і телекомунікаційним обладнанням інтернет-провайтера потрібно відкрити відповідні мережеві порти та налаштувати брандмауери. На кожному пристрої розгортається Zabbix Agent, який налаштовується для збору даних з урахуванням специфіки обладнання (рисунок 2).

3. Розроблення шаблонів моніторингу мережі. На цьому етапі створюються шаблони моніторингу, що містять налаштування для збору необхідних параметрів, і визначаються правила та порогові значення для автоматичних сповіщень [4]. У процесі його налаштування визначаються параметри збору інформації та зазначається IP-адреса сервера Zabbix, на який передаватимуться зібрані дані (рисунок 3). Серед метрик важливо контролювати пропускну здатність, стан портів, температурні показники та можливі несправності мережі. Завдяки такому підходу можна швидко виявляти і вирішувати проблеми у роботі обладнання. Це забезпечує уніфікацію процесу моніторингу та автоматизує контроль основних показників.

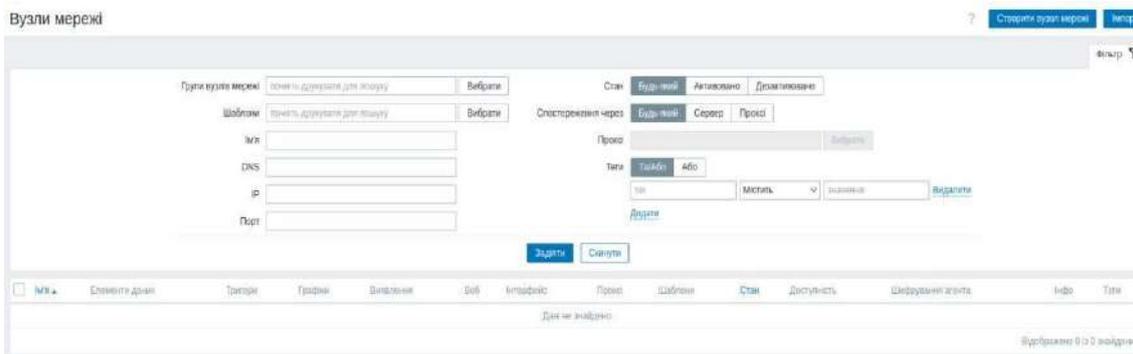


Рисунок 2 – Додавання вузлів мереж

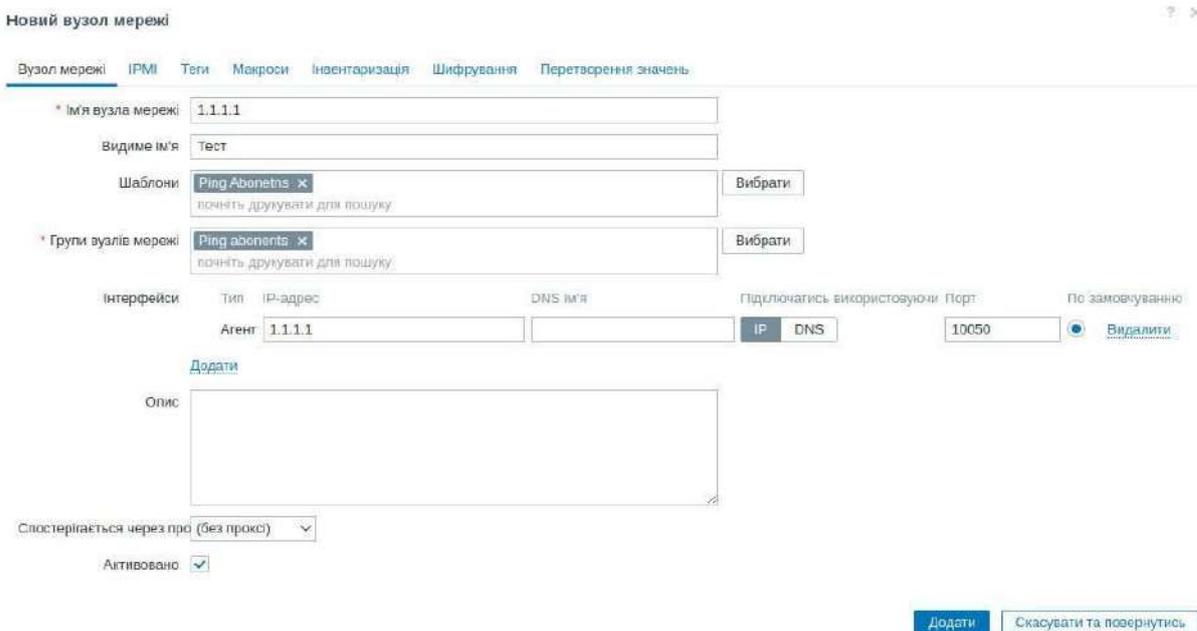


Рисунок 3 – Вибір шаблону Ping Abonetns

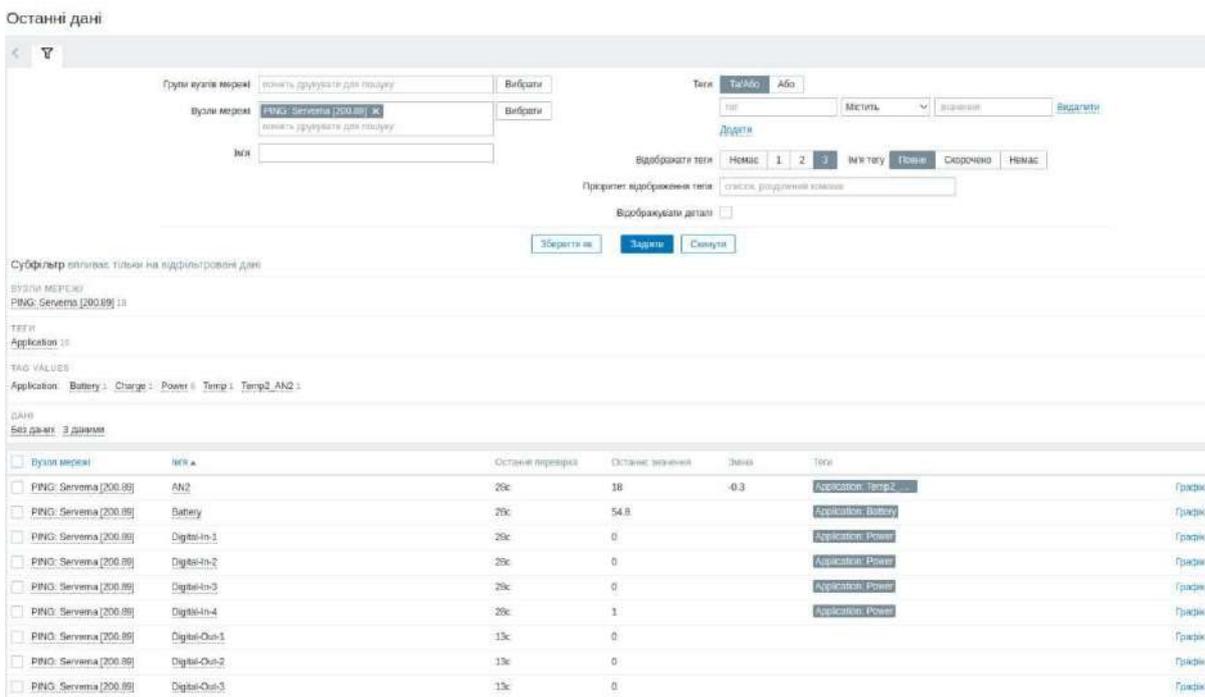


Рисунок 4 – Збір інформації з вузлів

4. Додавання обладнання до системи. Пристрої оптичної мережі вносяться до Zabbix із застосуванням відповідних шаблонів. Після цього перевіряється вірність збору інформації та її коректне відображення в системі (рисунок 4).

5. Тестування системи. Після інтеграції обладнання до системи Zabbix виконується тестування моніторингу для перевірки правильності збору та передачі даних на сервер. Зібрані дані аналізуються для підтвердження їхньої відповідності заданим параметрам. Для зручності аналізу створюються графіки, звіти, а також налаштовуються канали сповіщень, такі як електронна пошта чи SMS (рисунок 5). Створення звітів та документації щодо стану та ефективності роботи терміналів допомагає приймати стратегічні рішення й підтримувати високий рівень обслуговування. Система регулярно вдосконалюється й адаптується до змін у мережі або обладнанні. Додатково впроваджуються процедури резервного копіювання і відновлення даних для забезпечення їхньої захищеності.

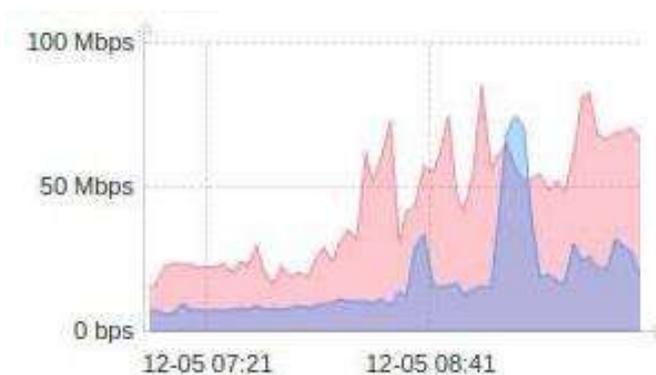


Рисунок 5 – Аналіз споживання трафіку

6. Налаштування інформаційних сповіщень. Система конфігурується таким чином, щоб у випадку появи помилок або нестандартної поведінки адміністратори могли оперативно отримувати сповіщення електронною поштою чи іншими доступними каналами (рисунок 6).

08:44:27	PING: Княгагупнок Soborna 65 [200.248]	Надвисока напруга акумулятора	14.4	1г 24хв 21с	Оновити
12:43:54	PING: Kovelska, 146 [200.252]	Розряд на акумуляторі	1, 13.2	16д 21г 24хв	Оновити
09:09:55	SN Ping3 Lavriv Centralna 1 [20.153]	PowerOFF	0, 13	56хв 56с	Оновити ✓ 1 2
09:09:11	SH Ping3 Pro min [20.154]	PowerOFF	0, 12.9	57хв 40с	Оновити ✓ 1 2

Рисунок 6 – Приклад оповіщення про збій в системі електрозабезпечення на лінійному терміналі OLT

7. Підтримання та подальший розвиток системи моніторингу. Постійна підтримка та оновлення як самих терміналів, так і відповідного програмного забезпечення забезпечують їх стабільну роботу та захист від потенційних загроз.

**Висновки.** Таким чином, впровадження системи моніторингу Zabbix для оптичних мереж можна розглядати як стратегічно обґрунтований крок, спрямований на підвищення ефективності управління мережевими ресурсами. Застосування такої системи забезпечує своєчасне виявлення відхилень у роботі, зниження ймовірності виникнення збоїв та підтримання безперервного функціонування мережевої інфраструктури. Крім того, інструменти моніторингу сприяють оптимізації роботи оптичних терміналів, що включає балансуювання навантаження,

удосконалення маршрутів передачі даних та планування подальшої модернізації або масштабування мережі.

#### Інформаційні джерела

1. Stallings W. Foundations of Modern Networking. – Pearson, 2015. [https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Cyber%20Security/William%20Stallings%20-%20Foundations%20of%20Modern%20Networking\\_%20SDN,%20NFV,%20QoE,%20IoT,%20and%20Cloud%20\(2015,%20Adison-Wesley%20Professional\)%20-%20libgen.li%20\(1\).pdf](https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Cyber%20Security/William%20Stallings%20-%20Foundations%20of%20Modern%20Networking_%20SDN,%20NFV,%20QoE,%20IoT,%20and%20Cloud%20(2015,%20Adison-Wesley%20Professional)%20-%20libgen.li%20(1).pdf) (дата звернення 01.11.2025)

2. Хлапонін Ю. І., Жиров Г. Б. Аналіз та моніторинг телекомунікаційної мережі на основі інтелектуальних технологій. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-1813/paper5.pdf> (дата звернення 01.11.2025)

3. Якимчук Н. М., Євсюк М. М. Адаптивний моніторинг когнітивних оптичних мереж для вирішення проблем обмеженої видимості цілісності фізичної інфраструктури. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2025. Випуск №26. С. 98-106. DOI: <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-13>

4. Zabbix Documentation. URL: <https://www.zabbix.com/documentation> (дата звернення 05.11.2025).

**Yeysiuk M. M., Yakymchuk N. M., Stadnyuk A. Yu.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

#### **METHODOLOGY FOR BUILDING AN OPTICAL NETWORK MONITORING SYSTEM USING THE ZABBIX PLATFORM**

*The paper examines the process of integrating optical terminals into a network monitoring system based on the Zabbix platform. A detailed algorithm for implementing the Zabbix monitoring system is presented, which includes installing and configuring the server, installing agents, creating monitoring templates, adding equipment, testing, and configuring information notifications. Particular attention is paid to the analysis of the processes of data collection, processing, and visualization, which allows for reliable control of the network infrastructure and timely detection of critical states.*

*The results of the study confirm the feasibility of using Zabbix for comprehensive monitoring of optical networks, since the system provides a high level of automation, flexible settings, and the ability to adapt to changes in the technical environment. The conclusions obtained can be used during the design, operation, and modernization of optical communication networks.*

**Keywords:** optical networks, optical terminals, network monitoring, Zabbix.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
18.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
14.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 681.516+004.932.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-8

Журавська І. М.<sup>1</sup>, Тонха О. Л.<sup>2</sup>, Нечай І. В.<sup>2</sup>, Гуменюк Т. В.<sup>3</sup><sup>1</sup>Чорноморський національний університет імені Петра Могили<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України<sup>3</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В ПРОСТОРОВОМУ КОРИДОРІ НА БАЗІ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто проблему керування групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або дронів, що виконують завдання у просторових коридорах із високою швидкістю зміни характеристик середовища. Робота акцентує увагу на неоднорідності дронів, їх різній конструкції, функціях, обчислювальних можливостях і типах каналів зв'язку, що утворюють складну динамічну гетерогенну мережу. Систематизовано міжнародні класифікації БПЛА та визначено актуальність дослідження в умовах зростання масштабу та складності операційних сценаріїв. Значна увага приділена поняттю швидкодинамічних процесів, які визначають вимоги до алгоритмів обробки інформації та прийняття рішень у групових системах. У роботі проаналізовано сучасні дослідження у сфері комп'ютерного зору, децентралізованої координації та мережесвих рішень для роїв дронів. Показано, що інтеграція алгоритмів, моделювання, симуляції та візуальних методів дозволяє суттєво підвищити точність навігації та можливість виявлення перешкод у стислому просторі (вузьких коридорах) при груповій взаємодії. Автори пропонують модель вибору цілей та розподілу задач між суброями БПЛА, що базується на аналізі матриці відстаней, а також застосування алгоритмів типу нейронної мережі Гопфілда для швидкого досягнення стабільного режиму спільної роботи. Окремо підкреслюється важливість симуляції руху БПЛА у 3D-просторі для дослідження поведінки рою та оптимізації уникнення зіткнень. Запропонований підхід дозволяє ефективно моделювати взаємодію елементів рою в умовах обмеженої інформації та динамічного середовища. Результати роботи можуть бути використані у системах логістики, автоматизованих складах, критичних інфраструктурах і для проектування систем керування роями БПЛА.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат (БПЛА), субрій дронів, гетерогенна мережа, розподілена система, маршрутизація, стислий простір, безпечна навігація, комп'ютерний зір, обробка зображень, нейронна мережа Гопфілда, система автоматичного керування, інформаційно-комп'ютерна система, багаторівневий аналіз відео-зображення.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) має велике значення в усіх сферах життя. БПЛА (або дрони) мають різноманітні конструктивні рішення в залежності від їх призначення (цільового об'єкта). Слід також зазначити, що окрім різних конструкцій БПЛА у межах спільної групи, можуть відрізнятися також комп'ютерні компоненти, з яких складаються дрони, їх виробники, канали зв'язку між дронами у межах групи тощо. Ця характеристика групи дронів називається гетерогенністю або неоднорідністю. Термін «гетерогенність» все частіше використовується в класифікації різних інформаційних технологій та комп'ютерних мереж [1; 2]. Парадигму гетерогенних комп'ютерних мереж (англ. Heterogeneous Network або HetNet) також можна розглядати з точки зору зміни топології утвореної мережі під час роботи групи дронів. З огляду на неоднорідність групи дронів, слід також враховувати класифікації БПЛА з урахуванням їх злітної маси та радіусу дії [3], а також типу керування [4]; дані класи представлені в табл. 1.

Серед країн-членів НАТО, як і в Україні, типові обмеження ваги для різних класів транспортних засобів також становлять 25 кг (клас I), 150 кг (клас II) та 600 кг (клас III). У межах цих класів БПЛА поділяються на 7 категорій. Різні організації в США (НАТО, Міністерство оборони США, НАСА, Федеральне авіаційне управління США тощо) мають визначені групи або класи БПЛА [5]. Більшість цих класифікацій базуються на вазі та висоті або швидкості. Наприклад, НАСА поділяє БПЛА на три категорії в залежності від ваги, повітряної швидкості, льотної придатності, конфігурації, управління та рівня безпеки – для досліджень в галузі атмосферних наук [6]. Згідно з Міжнародною класифікацією повітряного простору, дрони поділяються на 6 класів (A–G) залежно від здатності працювати на певній висоті над рівнем моря (до 60'000 футів над рівнем моря). Агентство з авіаційної безпеки Європейського Союзу (EASA)

створює загальноєвропейську систему з трьома категоріями експлуатації дронів – «відкрита» (для літальних апаратів з низьким рівнем ризику вагою до 25 кг), «спеціальна» (для польотів дронів потрібен дозвіл) або «сертифікована» (категорія найвищого ризику, – експлуатація дронів для доставки або пасажирських перевезень, або польоти над великими групами людей) – кожна з власним набором правил та індивідуальною ідентифікацією [7].

Таблиця 1 – Класифікація БПЛА

Класифікація БПЛА за злітною масою та радіусом дії	Класифікація БПЛА за типом керування
<ul style="list-style-type: none"> <li>• I-й клас (мікро, міні, малі) – до 150 кг та зоною прямої видимості до 50 км;</li> <li>• II-й клас (тактичні) – від 150 кг до 600 кг та зоною прямої видимості до 200 км;</li> <li>• III-й клас (оперативні, стратегічні) – понад 600 кг та поза зоною прямої видимості.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ручні (FPV та прості, без камер);</li> <li>• автономні (з використанням штучного інтелекту або фіксованих алгоритмів);</li> <li>• напівавтономні.</li> </ul>

Не можна заперечувати, що дрони різних рівнів класифікації можуть взаємодіяти один з одним. Але зростання гетерогенності призводить до значного збільшення складності управління пристроями та послугами всередині групи дронів і вимагає більш глибоких досліджень процесів побудови та ефективності послуг у цих мережах. Саме гетерогенність впроваджених рішень може забезпечити масштабованість комунікаційних послуг між БПЛА при критичному застосуванні у надзвичайних ситуаціях, у місцях лиха та екстремальних умовах.

#### Аналіз останніх досліджень.

Різними вченими проводяться дослідження в області гетерогенних мереж для БПЛА. Дослідження [8]. показує, що комп'ютерний зір може забезпечувати стабільну навігацію БПЛА у вузьких просторах завдяки поєднанню геометричних методів і глибинних мереж. Автори демонструють, що легковагові алгоритми візуальної локалізації здатні працювати в реальному часі на борту малих дронів. Робота акцентує на важливості прогнозування руху та швидкого виявлення перешкод. У роботі [9] наголошено, що задля скорочення часу на аналіз та обробку зображень з бортових систем спостереження доцільно зменшити площу обробленого зображення для подальшого розпізнання об'єктів інтересу. У роботі [10] наголошено, що для раціонального використання ресурсу рою ударних БПЛА необхідно врахування під час моделювання несиметричного конфлікту «неоднорідний рій БПЛА – різнорідні цільові об'єкти». В роботі [11] пропонується метод керування в реальному часі, що дозволяє гетерогенним БПЛА узгоджено планувати траєкторії під час групового польоту. Модель враховує різні динамічні можливості апаратів, що робить її придатною для змішаних роїв. У роботі підкреслено важливість швидких алгоритмів оптимізації для уникнення зіткнень у складних середовищах. В роботі [12] досліджується продуктивність гетерогенних мереж зв'язку у стислому просторі повітряних коридорів, використовуючи стохастичну геометрію. Дослідження демонструє, що правильне розташування повітряних ретрансляторів суттєво впливає на надійність каналу. Автори вказують на критичність латентності зв'язку для безпечної координації БПЛА. У роботі [13] представлено гетерогенний рій, де більші БПЛА виконують роль обчислювальних і комунікаційних вузлів, а малі – функції ближнього огляду та взаємодії з середовищем. Архітектура доводить ефективність розподіленого інтелекту та децентралізованого керування. Автори демонструють зниження навантаження на зв'язок завдяки використанню семантичних даних замість відеопотоків. В [14] Дуан і співавтори пропонують кооперативний метод планування шляхів для багатьох БПЛА у складних просторових маршрутах. Алгоритм працює розподілено, дозволяючи дронам погоджувати наміри без централізованого контролера. У роботі показано, що підхід ефективний навіть за часткових втрат зв'язку.

Згідно з наведеними дослідженнями можна зробити висновок, що використання гетерогенної мережі, де кожен БПЛА виконує спеціалізовані функції, дозволяє підвищити стійкість системи до перешкод, збоїв зв'язку та відмов окремих агентів. Додатково, інтеграція комп'ютерного зору забезпечує здатність дронів самостійно орієнтуватися, уникати зіткнень та розпізнавати об'єкти.

**Мета роботи** полягає в розробці моделі гетерогенної мережі для координації та керування групою БПЛА у просторовому коридорі з використанням комп'ютерного зору, яка забезпечує безпечну навігацію, стійкий зв'язок та запобігання зіткнень.

**Викладення основного матеріалу.** Гетерогенні бездротові мережі зараз підтримуються новітніми технологічними досягненнями в галузі бездротового зв'язку, а також інтеграцією різних функцій, таких як зондування, зв'язок, розвідка та проактивна діяльність. Ці мережі характеризуються здатністю обробляти великі дані з біологічної, хімічної та інших галузей промисловості для приватних, промислових, медичних, технічних, військових цілей та моніторингу навколишнього середовища. В процесі розвитку групи БПЛА вони стають більш динамічними. Характеристика «динамізм» потребує більш детального розгляду, оскільки зростає не лише складність цих мережевих систем та їх компонентів (сенсорів), але й швидкість руху дронів та обсяг їхніх завдань (рис. 1).

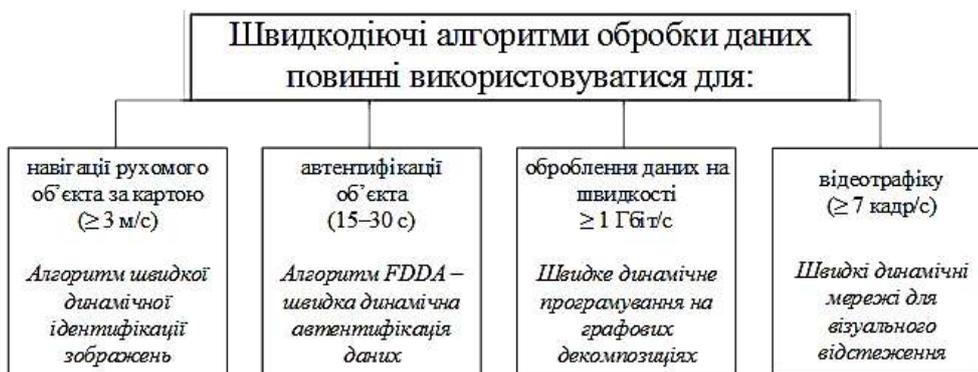


Рисунок 1 – Швидкодинамічні процеси в групі дронів

На відміну від звичайних «динамічних систем», які є детермінованими і можливо визначити множину всіх можливих станів такої системи в будь-який заданий момент часу, для «швидкодинамічних систем» неможливо однозначно передбачити всю їхню подальшу поведінку. Навіть знаючи координати та швидкість такої системи в початковий момент часу, неможливо заздалегідь визначити механічну перешкоду або електромагнітні перешкоди, з якими зіткнеться мобільна швидкодинамічна система (група дронів) під час роботи. Це може бути втрата якості сигналу зв'язку, руйнування топології групи та інші фактори, що потребують дослідження подальшого функціонування такої інформаційної системи. У цьому випадку в інформаційних системах обробка даних виконується на швидкостях гігабіт/с (Гбіт/с) для запобігання або виходу з критичної ситуації. Термін «швидка динаміка» був започаткований у 2014 р. на факультетах комп'ютерної інженерії та інформатики в Університеті Делавер (одному з перших університетів США) і розширився до теперішнього часу, коли у 2018 р. на академічних стандартах Корнельського університету (одного з 8 членів Ліги Плюща) було наголошено на необхідності впровадження швидких динамічних алгоритмів замість традиційних при відеотрафіку понад 1 Гбіт/с або 7 кадрів/с [15]. Незалежно від типу оброблюваних даних, виходячи з «швидкодинамічних процесів», вибір апаратного забезпечення дрона визначається тим, наскільки швидко він може обробити сигнал і як швидко він може переключитися на інше завдання.

Розглядаючи групу дронів, доцільно виділити такі етапи її управління: до інциденту, під час критичного застосування та після інциденту. У цьому випадку функції критичного застосування на основі групи дронів можна визначити за розробленою класифікацією, наведеною на рисунку 2.

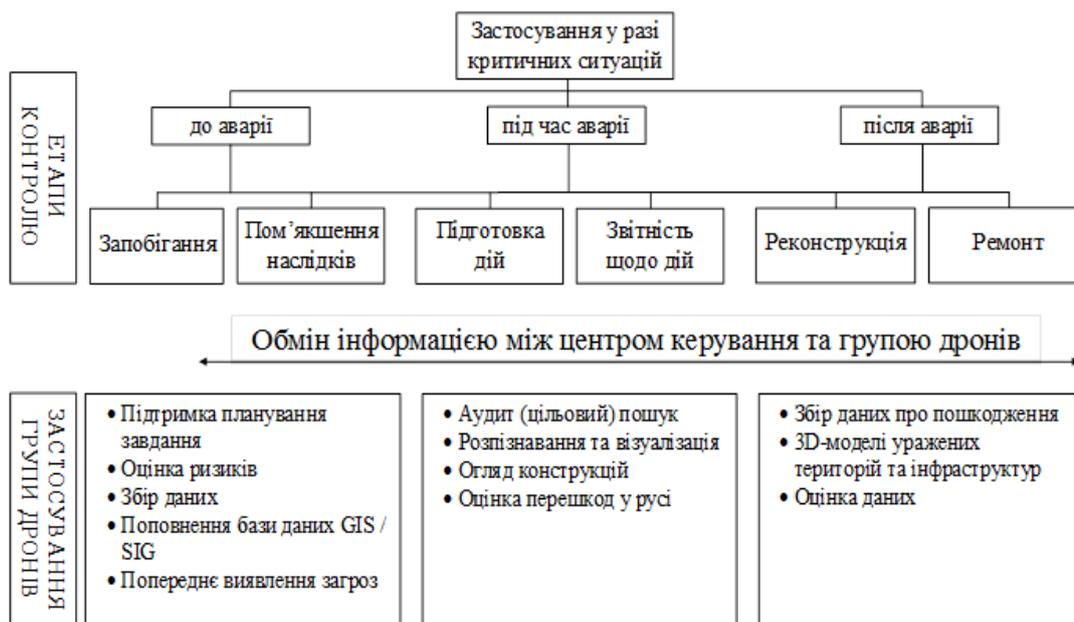


Рисунок 2 – Функції інформаційної системи при критичному застосуванні груп дронів

Для апаратної та програмної реалізації компоненти (модулі) БПЛА необхідно розділити за їхньою функцією. Таку класифікацію слід розглядати з точки зору моделі взаємодії відкритих систем – ISO/OSI або DoD (TCP/IP). Наприклад, у моделі DoD компоненти (модулі) БПЛА можна розділити на шари. Таким чином, для забезпечення функціонування групи дронів у різних технологіях необхідно враховувати всі розглянуті фактори – і неоднорідність, і швидкодинамічність, і особливості роботи групи дронів у критичних умовах. В іншому випадку теоретичні моделі, які переконливо працювали на екранах комп'ютерів, будуть дестабілізовані в реальному світі за наявності затримок, невизначеностей та кінематичних обмежень.

Одним із найперших прикладів досліджень у галузі групового керування був «проект MARTHA», виконаний у Лабораторії аналізу системних архітектур Франції у 1998 році [16]. Метою цього проекту була розробка методів організації групової взаємодії роботів (від 10 шт. до 100 шт.), призначених для транспортування вантажів у складських терміналах. Проект MARTHA використовував централізоване управління групою роботів, при якому планування дій кожної групи роботів здійснюється одним центральним пристроєм керування (рис. 3). Концепція проекту MARTHA полягає в наступному. Система керування групою роботів складається з двох основних частин: центру керування (ЦК) та бортових комп'ютерів з модулем зв'язку. ЦК встановлюється стаціонарно в командному центрі та вирішує завдання планування дій усієї групи роботів. Крім того, ЦК забезпечує оператора-людину кожним роботом групи на випадок непередбачених ситуацій, а також використовується для постановки цільового завдання. На борту кожного робота встановлено обчислювальний пристрій, який призначений для вирішення задачі руху до заданої мети. Контролер зв'язку служить для зв'язку з центральною станцією та іншою групою роботів.

За такими умовами має місце розподілена система – сукупність взаємодіючих дронів, які діють як єдиний комплекс для виконання завдань, центру керування та каналів зв'язку між ними.

У сучасних умовах взаємодію БПЛА у рою необхідно планувати з урахуванням специфіки децентралізованого управління, обмеженої інформації, змін цілерозподілу й характеристик середовища та потенційних конфліктів інтересів між окремими апаратами [10; 17].

Для взаємодії дронів у групі безпілотників необхідно вирішити проблеми збільшення відповідного часу роботи комп'ютерних компонентів, забезпечити можливість використання відкритих каналів зв'язку (аеропорти, військовий та цивільний транспорт тощо) в межах території дії такого угруповання для обміну інформацією з ЦК, незалежно від специфіки країни, де вона використовується. При цьому слід також звернути увагу на забезпечення стійкості та захисту інформації, якою обмінюється група безпілотників та ЦК. Виходячи з середовища, детермінованого чи недетермінованого, в якому функціонує група дронів, визначаються два

підходи до управління мобільним модулем: управління в детермінованому та недетермінованому середовищі.

У випадку детермінованого середовища, система керування може повністю обчислювати траєкторію руху за вже відомими алгоритмами. Цей підхід базується на тому, що система керування має всю необхідну інформацію про перешкоди в зоні своєї відповідальності, тобто має електронну карту місцевості, і може побудувати безпечний та оптимальний маршрут. Таке рішення є більш ефективним, оскільки маршрути можна розрахувати заздалегідь і не вимагатиме від групи дронів постійного коригування маршруту. Від дрона потрібне лише «сліпе» виконання команд ЦК, що, в свою чергу, знижує вимоги до апаратного забезпечення самої групи дронів. Водночас, додаткова електронна карта стану є обов'язковою умовою для роботи таких систем.

Вирішення проблеми в недетермінованих середовищах ускладнюється тим, що модуль керування знає лише початкові та кінцеві координати, які повинна «відвідати» група дронів. Усі завдання з розрахунку траєкторії маршруту передаються на дрони, тим самим ускладнюючи апаратну та програмну частину роботи. Так, для проходження певного маршруту дрон повинен визначити, чи може він продовжувати рух в тому чи іншому напрямку. В такому разі він повинен сам побудувати локальну карту перешкод середовища, в якому він знаходиться, і лише потім рухатися до мети. Хоча цей метод підвищує автономність кожного елемента групи, водночас він не є вигідним для використання в управлінні мережами моніторингу, оскільки призведе до зростання вартості кожного елемента мережі, ймовірність втрати якого дуже висока в умовах критичного застосування.

Оскільки обмін інформацією всередині рою обмежений, використання алгоритмів пошуку шляхів (таких як алгоритми Дейкстри, алгоритм Лі тощо) не буде ефективним у процесі досягнення мети. Найкращим варіантом є планування скоординованих дій у розподіленій системі та подальшого послідовного дотримання цього плану. На початку для кожного дрона роя необхідно зробити початковий вибір місця, щоб оцінити свою ефективність інших варіантів вибору. Для кожного БПЛА визначається найближча ціль.

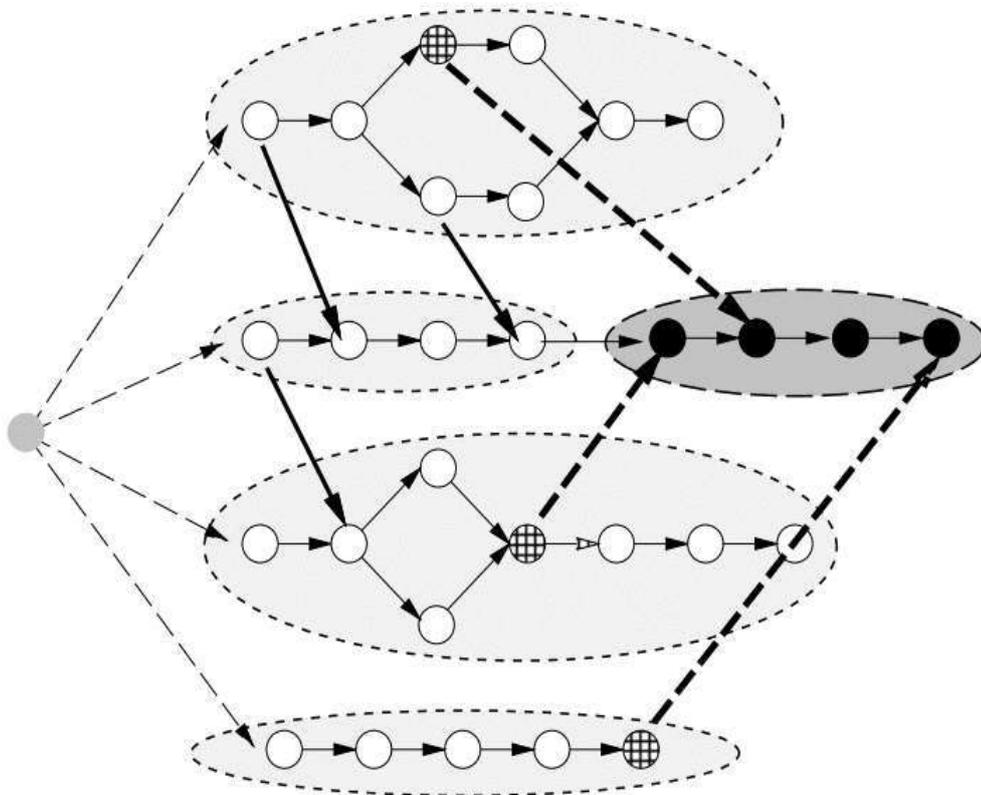


Рисунок 3 – Структура мережевої взаємодії транспортних безпілотних апаратів у проєкті MARTHA (Франція, 1998) при централізованому керуванні [16]

Вибір цілі здійснюється за допомогою спеціального вибору матриці:

$$T = \|t_{ij}\|, (i = 0, 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

Матриця (1) має розмір  $n \times m$ , де  $n$  – загальна кількість дронів;  $m$  – кількість цілей,  $X_{nm}$  – відстань, яку потрібно досягти для клітин із цілями  $m$ . Кожен дрон обчислює мінімальне значення  $X_{nm \min}$  і вважає його найоптимальнішим. Потім перевіряється відстань, і дрони, які мають найменшу відстань і не мають інших проблем, беруться за виконання завдання. Після цих операцій вибір цілей здійснюється знову. Якщо цілі не змінюються, приймається обраний план.

Отже, з'являється можливість оцінити реальний час, протягом якого дрон досягає цілей, не враховуючи всі можливі перешкоди на його шляху. Ця схема дозволяє дійсно обрати оптимальний план. Щоб впровадити відповідальність за динаміку навколишнього середовища (здатність відстежувати рух інших дронів), слід отримувати нові дані після певного періоду часу та можливих перекриттів маршрутів, перш ніж встановити ієрархію зупинок дронів.

Наступна модель представлена множиною моделей меншого обсягу (2):

$$M_{sm} = \langle MMO, MC, MIE, VU, VE, VY, VZ, S, F1, F2 \rangle, \quad (2)$$

де *MMO* – модель керованого об'єкта (*MO*), яка описує стан і характеристики дрона; *MC* – модель контролера, яка описує принципи роботи дронів; *MIE* – модель внутрішніх подій, яка описує випадкові події та їхні характеристики; *VU* – множина контрольованих і керованих параметрів: динамічні (мобільні) перешкоди на шляху дрона, характеристики роботи (швидкість руху, швидкість збору, максимальний заряд батареї, вага вантажу тощо); *VE* – множина випадкових збурень, які раптово виникають як динамічні перешкоди при русі дрону за рандомно заданим випадковим маршрутом; *VY* – множина вихідних параметрів, що використовуються в контролері: координати дрона, його стан і середовище пересування; *VZ* – множина вихідних параметрів поведінки дрона в заданих умовах; *S* – множина режимів системи: усі можливі комбінації елементів множин *VU*, *VE*, *VY*, *VZ*; *F1* – функція генерації керуючого вектора: правила та процедури, що відповідають за встановлення нових значень керованих параметрів; *F2* – функція, що відображає вхідні параметри *MO* на його вихід: правила та процедури, за допомогою яких обчислюється значення вихідних параметрів.

Особливу увагу слід приділяти вирішенню проблем, подібних до «задачі комівояжера», в окремих просторових коридорах. За такої швидкості неможливо обчислити сталий режим мережі дронів шляхом послідовного наближення помилки. Усі коефіцієнти матриці (1) слід обчислити за один цикл, після чого загальна мета для ройових дронів поділяється на підзавдання (для кожного з суброїв). Мережа на цьому етапі переходить у стабільний режим і залишається в ньому. Це означає, що після розподілу підзавдань у суброїв дронів ці завдання не будуть перерозподілені до їх реалізації.

Таке формулювання алгоритму є найближчим до алгоритму навчання мережі Хопфілда [18], де ознакою знаходження рішення є такий стабільний режим, який збігається з одним із збережених режимів під час навчання. Враховуючи той факт, що розташування цільових об'єктів у просторі не змінюється, цей конкретний об'єкт наступного разу (при наступній ітерації) буде знайдено в тому ж місці без помилок. Логічно розглядати синхронний режим функціонування мережі Гопфілда.

З іншого боку комп'ютерний зір відіграє ключову роль у забезпеченні автономності, безпеки та ефективної координації рою БПЛА, що працює у стислому просторі або повітряних коридорів, або приміщень. За такими умовами дрони не завжди можуть покладатися на дані GPS чи далекодістанційних сенсорів, мають обмежений доступ до традиційної навігаційної інфраструктури, а рівень перешкод суттєво зростає. Саме в таких умовах комп'ютерний зір стає основним інструментом для аналізу навколишнього середовища в реальному часі. Комп'ютерний зір дозволяє дронам виявляти статичні й рухомі об'єкти: стіни, виступи, інженерні конструкції, інші БПЛА, людей або техніку. За допомогою методів сегментації, класифікації та виділення контурів система формує локальну карту оточення з високою точністю, що життєво необхідно в обмеженому просторі. Для групи БПЛА комп'ютерний зір дозволяє не тільки бачити перешкоди, а й ідентифікувати інших учасників рою, прогнозувати їхню траєкторію та адаптувати власний курс. Це знижує навантаження на канали зв'язку, оскільки частину інформації дрон отримує локально з камер, а не лише через мережевий обмін.

Була змодельована робота суброю, який рухається у своєму просторовому коридорі. Такий субрій складається з двох пов'язаних між собою механізмів одного дрона, що виконують асинхронні задачі в одному просторовому коридорі (рис. 4). При цьому кожен механізм може виконувати окреме завдання у різних просторових координатах та/або в різний час. Наприклад, в якості таких механізмів може бути використана подвійна система асинхронного скиду із навіскою різноманітних вантажів, наведена на рис. 5 [19].

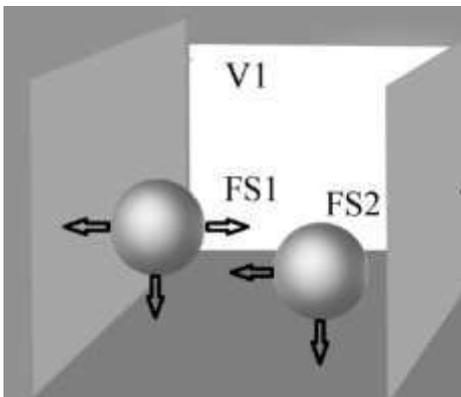


Рисунок 4 – Субрій, що складається з двох пов'язаних між собою механізмів одного дрона



Рисунок 5 – Подвійна система асинхронного скиду із навіскою різноманітних вантажів

Однак із зростанням кількості суброїв в одному коридорі ускладнюється процес централізованого керування. Суброї можуть мати різні напрямки руху залежно від поставлених цілей, структури просторового коридору та необхідності уникнення перешкод. Продуктивність виконання місії суттєво підвищується тоді, коли завдання раціонально розподіляються між двома або кількома дронами одного рою. Це дає змогу скоротити загальний час досягнення цілей, зменшити навантаження на окремий апарат і забезпечити більш ефективний огляд або доставку у складних умовах. Завдяки такому поділу зона покриття збільшується, а час реагування на ситуаційні зміни в коридорі значно скорочується.

Коли суброї виконують завдання сканування та вибору нерухомих об'єктів – кожен на своєму боці просторового коридору, – їхні режими одночасно змінюються на нові. Внаслідок цього вони можуть обмінюватися сторонами коридору між собою (рис. 6, б). Інакше вони можуть зіткнутися і зруйнувати роботу мережі. Тому необхідно моделювати паралельну роботу суброїв дронів, що застосовують послідовний алгоритм.

В такому разі необхідно окремо імітувати рух кожного суброю задля виявлення загрози зіткнень і уникнення таких зіткнень під час виконання завдання. Для того щоб обчислити нову позицію кожного дрона, інформаційно-комп'ютерна система повинна мати точні дані про його попереднє та поточне місцезнаходження, а також про оновлені координати найближчих апаратів. У повітряному просторі це особливо важливо, оскільки навіть невеликі зміщення сусіднього БПЛА можуть призвести до ризику зближення або зіткнення. Тому алгоритми планування траєкторій повинні враховувати динаміку руху рою, затримки передачі даних, можливі зміни швидкості та напрямків, а також прогнозувати поведінку найближчих членів групи.

Узгоджений рух БПЛА у спільному коридорі базується на постійному обміні телеметрією, оцінці відстаней і синхронізації маневрів у розподіленій системі. Чим більше апаратів працює одночасно, тим важливішими стають алгоритми запобігання конфліктам, локальної маршрутизації та адаптивного перерозподілу задач. У результаті загальна ефективність операції зростає не лише завдяки більшій кількості дронів, а й завдяки точності їхньої взаємодії та здатності рою колективно оптимізувати траєкторії в реальному часі.

Таблиця 2 – Час руху БПЛА між цілями в ручному режимі керування

Параметр	UAV-1	UAV-2
Тип	Малий квадрокоптер	Середній гексакоптер
Швидкість, м/с	4,0	5,0
Перешкоди	Колона (стовб) зліва, горизонтальна площа («полиця») зліва	Колона (стовб) справа, горизонтальна площа («полиця») справа
Загальна відстань, м	12,266	12,004
Середня швидкість (фактична), м/с	~4,0	~5,0
Час руху до цілі 1→2, с	0,503	0,346
Час руху до цілі 2→3, с	0,503	0,435
Час руху до цілі 3→4, с	0,503	0,425
Час руху до цілі 4→5, с	0,678	0,424
Час руху до цілі 5→6, с	0,746	0,425
Час руху до цілі 6→7, с	0,134	0,346
Загальний час руху, с	3,067	2,401

Для оцінки часу руху БПЛА в коридорі було здійснено тестові польоти в ручному режимі; результати такого тестування представлені в табл. 2. Оцінка руху двох БПЛА між цілями в ручному режимі (для FPV-дронів) повинна зосереджуватись на кількох ключових показниках: точності досягнення заданих точок, синхронності дій операторів, часі реакції на непередбачені перешкоди та ризику зіткнення. У ручному режимі оператори забезпечують високу гнучкість і можливість інтуїтивної корекції траєкторій, але водночас зростає навантаження на людину – особливо при одночасному контролі двох апаратів у вузькому просторовому коридорі. Необхідно порівняти заплановані та фактичні траєкторії (відхилення в метрах), виміряти затримки між командою оператора і реакцією БПЛА (latency), а також зафіксувати кількість і характер ручних корекцій (частота корекцій на хвилину). Критично важливі аспекти – стабільність каналу зв'язку та видимість операторів; при частих втратах відеопотоку або поганих погодних умовах точність знижується і безпека втрачається.

Рекомендується впровадити прості правила пріоритетів (який БПЛА має перевагу в просторі), запобіжні відстані між апаратами та процедури ручного взяття управління в разі рухомих перешкод. Для повної оцінки корисно провести серію тестових прогонів з реєстрацією телеметрії й відео, після чого статистично проаналізувати середні відхилення, максимальні затримки і число критичних інцидентів; на основі цього визначити, які елементи управління варто автоматизувати або підсилити підтримкою бачення (assistance) для зниження навантаження на оператора.

Кількість тактових циклів, необхідних для передачі актуальних позицій між БПЛА, зростає пропорційно кількості сусідніх апаратів, чие розташування слід враховувати під час перерахунку траєкторій. У рої, що рухається просторовим коридором, кожен дрон потребує оперативної інформації про швидкість, напрямок та маневри найближчих апаратів, що формує суттєве навантаження на комунікаційну підсистему. Це створює умови, за яких традиційні синхронні протоколи можуть спричиняти затримки, тому доцільно звернутися до використання асинхронних підходів – зокрема, до впровадження мережі Гопфілда в асинхронному режимі.

Для моделювання групового руху декількох БПЛА у вузьких коридорах доцільно представляти кожен дрон у вигляді сфери з певним радіусом. Це дає можливість формально враховувати габарити апарата, а також створювати буферну зону безпеки, яка гарантує уникнення зіткнень під час зближення або перехресного руху. Така спрощена геометрична інтерпретація (аналогічна варіантам, зображеним на рис. 6, а, б) дозволяє ефективно моделювати поведінку рою без надмірного обчислювального ускладнення.

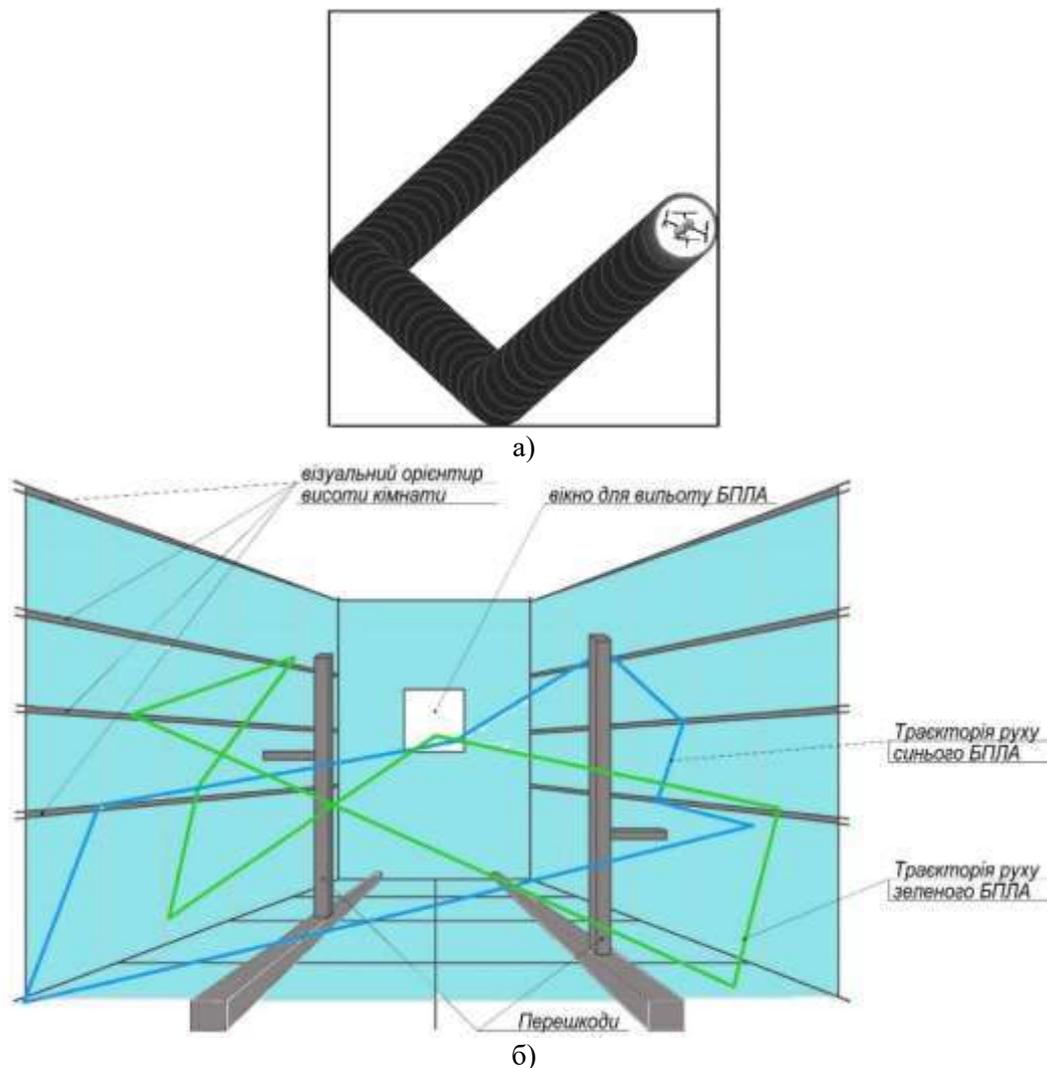


Рисунок 6 – Симуляція руху дронів у просторовому коридорі:  
а – дрон як просторова точка; б – траєкторія руху дронів у суброю

Під час моделювання руху БПЛА враховуються три ключові просторові координати:

- перша координата визначає бічне положення у коридорі (ліворуч або праворуч від центральної осі);
- друга координата відповідає за фронтальну позицію вздовж довжини коридору;
- третя координата визначає висоту польоту, яка є критичною для уникнення вертикальних конфліктів.

Таке тривимірне представлення дозволяє досліджувати динаміку руху підрозділу БПЛА у задачах кооперативної навігації, коли декілька дронів одночасно рухаються по різних підкоридорах або на різних висотних рівнях. Моделювання поведінки рою з використанням асинхронної мережі Гопфільда може бути застосоване не лише для оптимізації маршрутів, а й для визначення безпечних зон маневру, формування колективної тактики уникнення перешкод та корекції польоту в реальному часі.

Подібне моделювання є особливо корисним під час відпрацювання сценаріїв застосування БПЛА в логістичних, інспекційних та рятувальних операціях, де коридори можуть мати обмежений простір, складну конфігурацію або значну присутність статичних і рухомих перешкод. Завдяки цьому підхід дозволяє підвищити ефективність взаємодії рою та мінімізувати ризики небезпечних зближень і втрат зв'язку.

Тому симуляція є вкрай важливим інструментом для дослідження поведінки рою БПЛА, адже вона дозволяє відтворити складну реальну систему за допомогою математичних моделей та простежити її динаміку у різних сценаріях польоту. Моделювання дає змогу аналізувати не лише загальну траєкторію руху групи дронів, а й оцінювати поведінку кожного об'єкта розподіленої системи, їхню реакцію на перешкоди, зміни швидкості, відхилення сусідів та перебудову формації. Особливо корисним є дослідження сегментованих моделей руху, коли рій

поділяється на підгрупи, що виконують різні завдання у межах одного коридору або багаторівневої повітряної структури. Запропоновані рішення є наближеними, але достатньо ефективними для практичного використання. Використання мережі Гопфілда забезпечує швидкий пошук прийнятних траєкторій без потреби у численних ітераціях чи глибоких оптимізаційних процедурах. Це особливо важливо у високодинамічних умовах, коли рій БПЛА повинен постійно коригувати напрямок польоту.

Побудова маршруту підрозділу дронів шляхом з'єднання кількох двовимірних рішень у тривимірну структуру дозволяє ефективно моделювати рух у складних повітряних коридорах, де одночасно враховуються висота, бокове зміщення та фронтальний рух. У високошвидкісних динамічних мережах, таких як рої БПЛА, це дає змогу уникати критичних затримок та збоїв у роботі системи керування.

**Висновки.** У роботі розкрито актуальність проблеми через ускладнення сценаріїв застосування БПЛА – від цивільних логістичних операцій до спеціальних місій у надзвичайних ситуаціях. Представлений аналіз класифікацій БПЛА різних міжнародних організацій дозволяє зробити висновок про тенденцію до зростання різноманітності флотів, що робить проблему керування ще більш складною. Автори звертають увагу на необхідність швидкодинамічних підходів, оскільки традиційні детерміновані методи виявляються недостатньо ефективними за умов швидких змін та непередбачуваних впливів. Значну увагу приділено проблематиці побудови маршруту руху БПЛА у недетермінованому середовищі, де апарат повинен самостійно формувати локальну карту перешкод і коригувати траєкторію. Продемонстровано обмеження класичних алгоритмів пошуку шляхів та переваги застосування моделі вибору цілей за допомогою матриці відстаней, а також використання принципів мережі Гопфілда для швидкого досягнення стабільного режиму. Особливо цінним є представлений підхід до розподілу цілей та завдань між суброями дронів, що дозволяє уникати зіткнень і забезпечувати кооперативний рух у складних просторових умовах. Моделювання рою як розподіленої системи зі структурованими етапами управління – до інциденту, під час критичної ситуації та після її завершення – дозволяє глибше зрозуміти логіку функціонування гетерогенної мережі та вимоги до її архітектури. Окремо наголошується на важливості симуляції для оптимізації поведінки рою, що є особливо значущим у випадку складних 3D-коридорів. Це підкреслює практичну цінність роботи та її придатність для подальшої реалізації в системах автоматизованих складів, логістичних центрів чи групового управління БПЛА.

#### Інформаційні джерела

1. 15-th International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE–2019), Kunibiki Messe, Matsue, Japan, 2019. URL: <http://voyager.ce.fit.ac.jp/conf/hwise/2019/>
2. Zhuravska I. M., Musiyenko M. P. Mobile control system for heterogeneous movable network based on unmanned vehicles. Collection of Scientific Works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2017. Vol. 57. P. 30-40.
3. Мосов С. П., Хижняк В. В., Литовченко А. О., Ядченко Д. М. Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації у сфері цивільного захисту України. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2 (12). С. 54-68. DOI: 10.33269/nvcz.2021.2.54-68.
4. Троянський О. В., Кандєєв П. О. Класифікація безпілотних літальних апаратів за типами і технологіями керування. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(3). С. 89–100. DOI: 10.46299/j.isjea.20250403.08.
5. Szabolcsi R. UAV operator training – beyond minimum standards. *Scientific research and education in the air force – AFASES 2016*. June 2016. P. 193-198. DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.25.
6. NPR 7900.3D – Chapter5. Unmanned Aircraft Systems Operations : NASA Procedural Requirements. May 01, 2017–February 17, 2026. URL: [https://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg\\_img/N\\_PR\\_7900\\_003D/N\\_PR\\_7900\\_003D\\_Chapter5.pdf](https://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg_img/N_PR_7900_003D/N_PR_7900_003D_Chapter5.pdf) (Last accessed: 22.11.2025).
7. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945). Rev. July 2024. 468 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone> (Last accessed: 22.11.2025).
8. Kumar J., Himanshu H. K., Kandath H., Agrawal P. Vision based UAV Navigation through Narrow Passages, 2023 (arXiv preprint arXiv:2303.15803). DOI: 10.48550/arXiv.2303.15803
9. Худов Г. В., Хижняк І. А., Ярмолюк В. М., Марченко В. П. Методика обробки зображень з бортових систем спостереження в інтересах подальшої класифікації об'єктів

інтересу. *Системи обробки інформації*. 2022. Вип. 2 (169). С. 87-95. DOI: 10.30748/soi.2022.169.10.

10. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Метод динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення». *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2025. № 2 (53). С. 138-149. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.

11. Qian W., et al. Control-Oriented Real-Time Trajectory Planning for Heterogeneous UAV Formations. *Drones*, 2025. DOI: 10.3390/drones9020078

12. Armeniakos H.K., et al. A stochastic geometry-based performance analysis of UAV-assisted aerial corridor networks. *Frontiers in Communications and Networks*, 2024. DOI: 10.3389/frcmn.2024.1337697

13. Geng L., Li H., Givigi S., Adams B. SwarmUpdate: Hierarchical software updates and deep learning model patching for heterogeneous UAV Swarms : preprint. arXiv: 2503: 13784v1. Publ. 18 March, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.13784.

14. Duan, P., Chen D. Distributed cooperative path planning for multi-UAV in complex environments. *Drones*. 2025. Vol. 9 (1), no. 38. DOI: 10.3390/drones9010038.

15. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p. URL: <https://www.amazon.com/Heterogeneous-computer-networks-critical-application/dp/6139863570> (Last accessed: 21.11.2025).

16. Alami R., Fleury S., Herrb M., Ingrand F., Robert F. Multi robot cooperation in the MARTHA project : Report / Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS). *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 1998. Vol. 5, no. 1. P. 36-47. DOI: 10.1109/100.667325.

17. Компанієць О. М., Ткачов А. М. Удосконалена модель оцінки очікуваної корисності БПЛА у ройовому цілерозподілі при динамічному розіграші бойових дій. *Системи обробки інформації*. 2024. Вип. 3, № 178. С. 42-47. DOI: 10.30748/soi.2024.178.05.

18. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) of the USA*. 2001. Vol. 98, No. 3. P. 1282-1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.

19. Подвійна система скиду із універсальною навіскою різноманітних вантажів для FPV коптерів. *Безпілотні та роботизовані рішення в повітрі, на воді та на землі* : вебсайт компанії «POLYDRONE». URL: <https://polydrone.com.ua/ua/p2087554220-podvijna-sistema-skidu.html?srsltid=AfmBOop6dkPW44UAdMSX-Gh8FuYApDx4-lizPDpyXKoYhZPB9qQMYzpJ> (дата звернення: 21.11.2005).

**Zhuravska I., Tonkha O., Nechai I., Humeniuk T.**

### **CONTROL OF A GROUP OF UAVS USING COMPUTER VISION IN A SPATIAL CORRIDOR BASED ON A HETEROGENEOUS NETWORK**

The article considers the problem of controlling a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones that perform tasks in spatial corridors with a high rate of change in environmental characteristics. The work focuses on the heterogeneity of drones, their different design, functions, computing capabilities and types of communication channels that form a complex dynamic heterogeneous network. International classifications of UAVs are systematized and the relevance of the study is determined in the context of increasing scale and complexity of operational scenarios. Considerable attention is paid to the concept of fast-dynamic processes that determine the requirements for information processing algorithms and decision-making in group systems. The paper analyzes modern research in the field of computer vision, decentralized coordination and network solutions for drone swarms. It is shown that the integration of algorithms, modeling, simulation and visual methods allows to significantly increase the accuracy of navigation and the ability to detect obstacles in confined space (narrow corridors) during group interaction. The authors propose a model of target selection and task distribution between UAV subswarms, based on distance matrix analysis, as well as the use of algorithms such as the Hopfield neural network to quickly achieve a stable group interaction mode. The importance of simulating UAV movement in 3D space for studying swarm behavior and optimizing collision avoidance is emphasized. The proposed approach allows for effective modeling of swarm element interaction in conditions of

limited information and dynamic environment. The results of the work can be used in logistics systems, automated warehouses, critical infrastructures, and for designing UAV swarm control systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV), drone subswarm, heterogeneous network, distributed system, routing, confined space, safety navigation, computer vision, image processing, automatic control system, Hopfield neural network, information and computer system, multi-level video image analysis.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
14.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
11.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 519.8: 004.6: 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-9

Іванюта О. Я., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет

## КЛАСИФІКАЦІЯ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ

*У роботі проведено аналіз типових схем роботи індивідуальних теплових пунктів. Встановлено, що ІТП забезпечують ефективний розподіл теплової енергії між системами опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, адаптуючи параметри теплоносія до потреб конкретної будівлі незалежно від режимів централізованої мережі. Проаналізовано залежні та незалежні схеми підключення, їх переваги та недоліки. Розглянуто підходи до математичного, фізичного та емпіричного моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП). Моделювання є важливим інструментом для аналізу та оптимізації різних систем, зокрема в теплопостачанні. Вибір методу моделювання залежить від специфіки завдання, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Математичні моделі є ефективними для вирішення задач, де важлива швидкість обчислень, але вони можуть бути менш точними порівняно з фізичними. Фізичні моделі надають високу точність завдяки детальному опису процесів, проте потребують значних обчислювальних потужностей. Емпіричне моделювання дозволяє працювати з реальними даними, але точність таких моделей залежить від якості та обсягу доступної інформації.*

**Ключові слова:** індивідуальні теплові пункти, схеми підключення, моделювання.

**Постановка проблеми.** Індивідуальний тепловий пункт є ключовим елементом енергоефективної системи теплопостачання будівлі, що забезпечує автоматизоване регулювання подачі тепла з метою створення стабільного мікроклімату та оптимізації енергоспоживання [1]. Завдяки інтегрованим механізмам регулювання, ІТП адаптує рівень теплопостачання до змінних зовнішніх температурних умов, запобігаючи перегріву приміщень у тепліші періоди та підтримуючи необхідний рівень тепла в холодні дні.

Основною функцією теплових пунктів є контроль за витратою та розподілом теплоносія між різними зонами будівлі, такими як радіаторні системи опалення, підлогове опалення тощо. Це дозволяє усунути проблему нерівномірного розподілу теплової енергії, що сприяє покращенню комфорту мешканців та зменшенню енергетичних втрат [2].

Крім того, ІТП відіграє важливу роль у регулюванні гідравлічного балансу системи теплопостачання, стабілізуючи тиск і витрату теплоносія. Це забезпечує не лише ефективну передачу тепла, а й знижує ризик виникнення гідравлічних ударів, шуму в трубопроводах та інших небажаних явищ [2]. Додатково, використання теплового пункту запобігає негативному впливу перепадів тиску в центральній тепловій мережі, що сприяє продовженню експлуатаційного ресурсу всієї системи.

Сучасні ІТП оснащені системами автоматизованого керування, що дозволяє здійснювати моніторинг та коригування параметрів теплопостачання відповідно до графіків використання будівлі. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити витрати на опалення в періоди зниженого енергоспоживання, наприклад, у нічний час або під час вихідних днів, що є важливим аспектом підвищення загальної енергоефективності будівлі [3].

Окрім функцій опалення, ІТП здійснює підготовку гарячої води для побутових потреб шляхом використання теплообмінників, які передають теплову енергію від теплоносія до холодної води, забезпечуючи її нагрівання до необхідної температури [4]. Завдяки цьому гаряча вода розподіляється до всіх точок споживання – кранів, душових, побутових приладів – із гарантованим рівнем комфорту та безпеки.

Важливою перевагою ІТП є його незалежність від опалювального сезону: система забезпечує постійне постачання гарячої води протягом усього року. Крім того, можливе інтегрування альтернативних джерел енергії, таких як сонячні теплові колектори чи електричні нагрівачі, що дозволяє додатково зменшити навантаження на централізовану систему теплопостачання.

Індивідуальні теплові пункти (ІТП) являють собою комплекс обладнання, призначений для розподілу теплової енергії від централізованої теплової мережі до систем опалення, вентиляції

та гарячого водопостачання окремої будівлі або її частини. Основною функцією ІТП є забезпечення необхідних параметрів теплоносія (температури і тиску) для кожної системи споживання незалежно від параметрів теплоносія в центральній мережі. Крім того, ІТП дозволяють створювати роздільні контури теплопостачання для різних потреб об'єкта, таких як водяне опалення, «тепла підлога» та гаряче водопостачання [5].

Індивідуальні теплові пункти відрізняються гнучкістю та можуть бути адаптовані до різних типів будівель та теплових мереж з різними вимогами до параметрів теплоносія. Модульні конструкції ІТП спрощують їх монтаж та обслуговування, а також дозволяють легко інтегрувати їх у вже існуючі системи теплопостачання.

**Метою роботи** є аналіз та класифікація підходів та методів моделювання індивідуального теплового пункту.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Існує кілька основних схем підключення та функціонування індивідуальних теплових пунктів, які можуть бути класифіковані за різними критеріями, включаючи спосіб приєднання до теплової мережі (залежний або незалежний) та кількість ступенів підігріву води для гарячого водопостачання.

Однією з найпростіших залежних схем є схема з елеваторним вузлом [6]. В елеваторі відбувається підмішування охолодженого теплоносія зі зворотної лінії системи опалення до гарячого теплоносія з подавального трубопроводу теплової мережі, що дозволяє знизити температуру теплоносія, який подається до опалювальних приладів.

Іншим варіантом залежної схеми є використання циркуляційного насоса на подавальному трубопроводі системи опалення [7]. Ця схема часто застосовується, коли розрахункова температура теплоносія від джерела тепла перевищує необхідну температуру для системи опалення.

Існують також залежні схеми з циркуляційним насосом на зворотному трубопроводі [8]. Така схема може бути доцільною, коли температура подавального трубопроводу теплової мережі може перевищувати температурні обмеження для циркуляційного насоса.

У незалежних схемах підключення між тепловою мережею та системою опалення встановлюється теплообмінник, який забезпечує передачу тепла від теплоносія центральної мережі до теплоносія, що циркулює в опалювальній системі будівлі, без їх безпосереднього змішування. Зазвичай використовуються розбірні пластинчасті теплообмінники, які є зручними в обслуговуванні та ремонті, а також дозволяють збільшувати потужність системи при необхідності [9].

Більш універсальною є схема з двоступінчастим змішаним приєднанням підігрівачів ГВП. Двоступінчаста схема є ефективнішою, особливо в зимовий період, оскільки дозволяє більш повно використовувати теплову енергію зворотного теплоносія [10].

**Викладення основного матеріалу.** Математичне моделювання теплотехнічних систем базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії та імпульсу, які є основою для розробки відповідних математичних рівнянь. Для опису динамічних процесів у часі використовуються диференціальні рівняння, що дозволяють аналізувати зміну параметрів системи з плином часу. При розробці математичних моделей визначають граничні умови, які описують взаємодію системи з навколишнім середовищем, а також властивості матеріалів, що використовуються в системі [11].

У процесі математичного моделювання часто виникає потреба у спрощеннях та припущеннях для зменшення складності моделі та забезпечення можливості її розв'язання. Важливим аспектом є вибір рівняння стану теплоносія, наприклад, води, та його властивостей, таких як теплоємність, в'язкість та теплопровідність, оскільки ці параметри можуть змінюватися залежно від температури та тиску, що необхідно враховувати при моделюванні в широкому діапазоні робочих умов [12].

*Математичне моделювання окремих компонентів ІТП.*

**Теплообмінники.** Математичне моделювання теплообмінників, які є одними з елементів ІТП, може здійснюватися різними методами. Баланс енергії є фундаментальним підходом, що базується на рівняннях теплопередачі, які враховують масові витрати, теплоємності та різницю температур гарячого та холодного теплоносіїв. Метод середньої логарифмічної різниці температур (LMTD) використовує середню температурну різницю між гарячим та холодним теплоносіями вздовж теплообмінника для розрахунку кількості переданого тепла. Метод LMTD є зручним при відомих вхідних та вихідних температурах теплоносіїв, але має обмеження для

складних конфігурацій теплообмінників та випадків, коли коефіцієнт теплопередачі залежить від температури [13].

Метод ефективності-NTU ( $\epsilon$ -NTU) є більш універсальним підходом, який використовує безрозмірні параметри для визначення ефективності теплообмінника, що є відношенням фактично переданого тепла до максимально можливого. Метод  $\epsilon$ -NTU є особливо зручним при невідомих вихідних температурах теплоносіїв, а також для теплообмінників зі складними схемами потоків [14].

*Насоси.* Математичне моделювання насосів в ІТП включає використання характеристичних кривих насосів, які відображають залежність напору (H) від об'ємної витрати (Q). Гідрравлічні розрахунки використовуються для визначення перепаду тиску ( $\Delta p$ ) в залежності від витрати та гідрравлічного опору системи, що може включати динамічний перепад тиску. Для моделювання насосів з частотним регулюванням використовуються закони подібності (affinity laws), які описують зв'язок між швидкістю обертання насоса (n) та його характеристиками: витратою (Q), напором (H) та потужністю (P) [12].

*Клапани.* Математичне моделювання регулюючих клапанів в ІТП базується на їхніх характеристиках витрати. Власні характеристики клапанів відображають залежність відносного коефіцієнта витрати K, від відносного положення клапана h для різних типів клапанів, таких як лінійні, рівнопроцентні та швидкодіючі [12].

*Системи керування.* Математичне моделювання систем керування в ІТП включає опис алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори, математичними рівняннями, які визначають їхню поведінку на основі вхідних сигналів та заданих параметрів. Моделювання датчиків передбачає опис залежності їхнього вихідного сигналу (наприклад, напруги або струму) від вимірюваного параметра, такого як температура, тиск або витрата. Моделювання логіки керування включає опис послідовності дій та рішень, що приймаються системою керування в залежності від вхідних сигналів та внутрішнього стану системи. При моделюванні систем керування може знадобитися врахування затримок у часі реакції компонентів та гістерезису, оскільки ці фактори можуть впливати на стабільність та точність роботи системи керування, особливо в динамічних режимах [12, 15].

Математичне моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП) є ключовим інструментом для аналізу, оптимізації та вдосконалення їхньої роботи. Воно забезпечує можливість швидкого й відносно недорогого дослідження різних режимів функціонування системи, дозволяючи оцінювати вплив параметрів на ефективність та енергоспоживання.

#### *Підходи до фізичного моделювання ІТП*

Фізичне моделювання індивідуальних теплових пунктів передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення віртуальних моделей ІТП та їхніх компонентів. Ці моделі базуються на фундаментальних законах фізики, що описують процеси теплопередачі та гідрравліки, які відбуваються в системі. Фізичне моделювання дозволяє моделювати складні системи з урахуванням взаємодії між різними компонентами, що є важливим для розуміння їхньої комплексної поведінки. Фізичне моделювання дозволяє враховувати складні термогідрравлічні явища та динамічні процеси в ІТП з високою точністю, що особливо важливо для моделювання перехідних режимів роботи, аварійних ситуацій або інтеграції нових технологій [16].

Для фізичного моделювання ІТП використовується різноманітне програмне забезпечення.

Modelica та Dymola застосовуються для моделювання та проєктування двонаправлених теплообмінних підстанцій, призначених для теплових користувачів, з використанням бібліотек компонентів для моделювання трубопроводів, клапанів, насосів та датчиків.

TRNSYS використовується для моделювання сонячних систем теплопостачання, що включають ІТП, дозволяючи моделювати як компоненти підстанції, так і систему опалення будівлі.

Argos є потужним інструментом для створення детальних моделей систем централізованого теплопостачання, включаючи моделювання окремих ІТП споживачів.

Simulink широко застосовується для розробки математичних моделей елементів ІТП, таких як теплообмінники, клапани керування, триходові клапани та відцентрові насоси, з метою їхньої подальшої симуляції в реальному часі.

Різні програмні засоби мають свої особливості та переваги для моделювання ІТП, і вибір конкретного інструменту залежить від поставленої задачі, необхідного рівня деталізації та наявності відповідних бібліотек компонентів.

Фізичне моделювання застосовується для аналізу теплообмінних підстанцій, моделювання теплогидравлічних мереж і оцінки впливу споживачів тепла на роботу системи. Фізичне моделювання дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо проектування, експлуатації та модернізації централізованого тепlopостачання.

#### *Підходи до емпіричного моделювання ІТП*

Емпіричне моделювання індивідуальних теплових пунктів базується на використанні історичних даних про їхню роботу, таких як температура, витрата теплоносія, тиск та енергоспоживання. Для побудови моделей застосовуються статистичні методи, включаючи регресійний аналіз та аналіз часових рядів, а також методи машинного навчання, такі як нейронні мережі та дерева рішень. У процесі емпіричного моделювання відбувається ідентифікація ключових факторів, що впливають на поведінку ІТП, наприклад, температура зовнішнього повітря, час доби або день тижня. На основі виявлених закономірностей будуються моделі для прогнозування теплового навантаження, виявлення аномалій у роботі системи та оптимізації її функціонування [17].

Для емпіричного моделювання ІТП застосовуються різноманітні статистичні моделі та методи машинного навчання. Моделі часових рядів, такі як SARIMAX, використовуються для прогнозування теплового навантаження та виявлення відхилень у роботі ІТП шляхом аналізу часової динаміки даних. Нейронні мережі, зокрема багатошарові перцептрони (MLP), демонструють високу ефективність у прогнозуванні теплового навантаження та виявленні складних нелінійних залежностей між різними параметрами системи. Регресійний аналіз застосовується для визначення статистичної залежності енергоспоживання від різних факторів, таких як температура зовнішнього повітря або характеристики будівлі. Методи кластеризації можуть використовуватися для виявлення груп ІТП зі схожою поведінкою, що дозволяє застосовувати колективний моніторинг та виявляти аномалії на основі порівняння поведінки окремих ІТП з поведінкою відповідного кластера. Методи машинного навчання здатні виявляти складні закономірності в даних про роботу ІТП, які можуть бути непомітні при використанні традиційних статистичних методів, що може призвести до більш точних прогнозів та ефективніших стратегій керування [18].

Основними перевагами цього підходу є простота побудови, відсутність необхідності глибоких фізичних знань та можливість швидкої адаптації до нових даних. Проте емпіричні моделі мають і недоліки: вони залежать від якості та повноти вхідних даних, часто є специфічними для конкретної системи й можуть мати обмежену здатність до узагальнення. Також такі моделі важко інтерпретувати, оскільки вони працюють за принципом «чорної скриньки».

Емпіричне моделювання широко використовується в тепlopостачанні, зокрема для моніторингу стану теплових підстанцій, прогнозування теплового навантаження та оптимізації роботи системи. Його застосовують для виявлення неефективної роботи обладнання, оцінки теплових рейтингів на основі інфрачервоної термографії та аналізу енергоспоживання будівель. Використання емпіричних моделей допомагає зменшити витрати на експлуатацію, підвищити надійність системи та оптимізувати її енергоспоживання.

Вибір методу моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП) залежить від конкретних завдань, доступних ресурсів та необхідного рівня точності.

Математичне моделювання вимагає менше обчислювальних ресурсів, однак його точність може бути нижчою в порівнянні з фізичним моделюванням, особливо коли йдеться про складні фізичні явища. Фізичне моделювання забезпечує високу точність, оскільки детально враховує всі фізичні процеси в системі, проте потребує значних обчислювальних ресурсів та детальних даних про систему. Емпіричне моделювання є простішим у побудові, оскільки не потребує глибоких знань фізики та базується на аналізі даних, однак його точність сильно залежить від якості та обсягу доступних даних. Крім того, такі моделі можуть бути обмеженими у своїй здатності до узагальнення на інші об'єкти або сценарії.

Для різних аспектів роботи ІТП можуть бути більш ефективними різні методи. Наприклад, для детального моделювання теплопередачі в теплообмінниках фізичні методи, такі як метод кінцевих елементів або метод контрольованого об'єму, забезпечують найвищу точність. Для гідравлічних розрахунків у насосах та трубопроводах як математичні, так і фізичні моделі дають прийнятні результати, хоча фізичні моделі здатні краще враховувати складні ефекти, такі як турбулентність. Моделювання систем керування може здійснюватися за допомогою математичних рівнянь або спеціалізованих інструментів програмного забезпечення для

фізичного моделювання. Для прогнозування теплового навантаження будівель найефективнішими часто є емпіричні та гібридні моделі, оскільки вони здатні враховувати складні фактори, такі як поведінка мешканців та погодні умови.

Подальший розвиток моделювання ІТП це підвищення точності моделей для опису складних фізичних явищ та нестаціонарних режимів роботи. Серед пріоритетних напрямків досліджень – розробка ефективних методів валідації моделей на основі реальних даних, створення інтегрованих платформ для поєднання ІТП з мережами централізованого теплопостачання, а також застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації моделей.

Ці технології відкривають нові можливості для моніторингу, діагностики та управління ІТП. Моделі реального часу використовуються для виявлення аномалій та прогнозування несправностей, а цифрові двійники – для навчання персоналу, тестування та оптимізації керування. Їх інтеграція з автоматизованими системами може забезпечити створення інтелектуальних систем теплопостачання, здатних адаптуватися до змінних умов у режимі реального часу.

**Висновки.** Проведено аналіз типових схем роботи індивідуальних теплових пунктів. Встановлено, що ІТП забезпечують ефективний розподіл теплової енергії між системами опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, адаптуючи параметри теплоносія до потреб конкретної будівлі незалежно від режимів централізованої мережі. Проаналізовано залежні та незалежні схеми підключення, їх переваги та недоліки. Залежні схеми (зокрема, з елеваторним вузлом або циркуляційними насосами) відрізняються простотою та низькими капітальними витратами, але мають обмежену ефективність регулювання. Незалежні схеми, що передбачають використання теплообмінників, забезпечують гідравлічну ізоляцію системи та кращий контроль параметрів, проте вимагають більших початкових інвестицій.

Розглянуто підходи до математичного, фізичного та емпіричного моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП). Моделювання є важливим інструментом для аналізу та оптимізації різних систем, зокрема в теплопостачанні. Вибір методу моделювання залежить від специфіки завдання, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Математичні моделі є ефективними для вирішення задач, де важлива швидкість обчислень, але вони можуть бути менш точними порівняно з фізичними. Фізичні моделі надають високу точність завдяки детальному опису процесів, проте потребують значних обчислювальних потужностей. Емпіричне моделювання дозволяє працювати з реальними даними, але точність таких моделей залежить від якості та обсягу доступної інформації.

#### Інформаційні джерела

1. ДБН В.2.5-39:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. Зі Зміною № 1. [Чинний від 2018-07-01]. Київ: УкрНДІнжпроект, 2008. 45 с.
2. Робочі схеми автоматизації систем опалення будівель. URL: <https://firebox.com.ua/uk/shemy-avtomatizacii-sistem-teplosnabzheniya-zdanij/> (дата звернення: 01.06.2025).
3. Оптимізація теплопостачання об'єктів. URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4374.php> (дата звернення: 01.06.2025).
4. Квартирні теплові пункти: застосування для опалення та ГВП. URL: <https://aw-therm.com.ua/kvartirnij-teplovij-punkt-zastosuvannya-dlya-opalennya-ta-gvp/> (дата звернення: 01.06.2025).
5. Індивідуальні теплові пункти: переваги встановлення та роль у реформуванні системи теплопостачання. URL: <https://energysecurityua.org/ua/blogs-ua/indyvidualni-teplovi-punkty-perevahy-vstanovlennia-ta-rol-u-reformuvanni-systemy-teplopostachannia/> (дата звернення: 01.06.2025).
6. Індивідуальний тепловий пункт для багатоквартирного будинку: схеми та рішення. URL: <https://aw-therm.com.ua/indyvidualnij-teplovij-punkt-shemi-ta-rishennya/> (дата звернення: 01.06.2025).
7. Schemes of the heating substation for the heating system. URL: <https://www.ter-en.com/en/skhema/itp> (дата звернення: 01.06.2025).

8. Автоматизовані індивідуальні теплові пункти. Будівництво і експлуатація. URL: [https://www.mdi.org.ua/images/Files/MERP/Lutsk\\_sem\\_21-23092016\\_presentations/Lutsk\\_sem\\_21-23092016\\_pres\\_ІТР\\_Колієнко-5.pdf](https://www.mdi.org.ua/images/Files/MERP/Lutsk_sem_21-23092016_presentations/Lutsk_sem_21-23092016_pres_ІТР_Колієнко-5.pdf) (дата звернення: 01.06.2025).
9. Індивідуальний тепловий пункт – що це, принципи, схеми, поради. URL: <https://bio.ukr.bio/ua/articles/9932/> (дата звернення: 01.06.2025).
10. Use of a two-stage combined scheme for heat exchangers connection in heating points for hot water supply of insulated buildings. URL: [https://www.researchgate.net/publication/384574980\\_USE\\_OF\\_A\\_TWO-STAGE\\_COMBINED\\_SCHEME\\_FOR\\_HEAT\\_EXCHANGERS\\_CONNECTION\\_IN\\_HEATING\\_POINTS\\_FOR\\_HOT\\_WATER\\_SUPPLY\\_OF\\_INSULATED\\_BUILDINGS](https://www.researchgate.net/publication/384574980_USE_OF_A_TWO-STAGE_COMBINED_SCHEME_FOR_HEAT_EXCHANGERS_CONNECTION_IN_HEATING_POINTS_FOR_HOT_WATER_SUPPLY_OF_INSULATED_BUILDINGS) (дата звернення: 01.06.2025).
11. Mathematical Models of Thermal Systems. URL: <https://ipsa.swarthmore.edu/Systems/Thermal/SysThermalModel.html> (дата звернення: 01.06.2025).
12. District heating substation elements modeling for the development of the real-time model. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330861901\\_District\\_heating\\_substation\\_elements\\_modeling\\_for\\_the\\_development\\_of\\_the\\_real-time\\_model](https://www.researchgate.net/publication/330861901_District_heating_substation_elements_modeling_for_the_development_of_the_real-time_model) (дата звернення: 01.06.2025).
13. Log Mean Temperature Difference (LMTD) Method. URL: <https://library.fiveable.me/heat-mass-transfer/unit-5/log-temperature-difference-lmtd-method/study-guide/IVMM1ZblQzMWnsbX> (дата звернення: 01.06.2025).
14. Effectiveness-NTU Method. URL: <https://library.fiveable.me/heat-mass-transfer/unit-5/effectiveness-ntu-method/study-guide/kz42EsEzE0KkHv4t> (дата звернення: 01.06.2025).
15. Management and Control for Optimal Performance of the Heating. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/95fa234b-2558-4c5f-b0f9-267ee13d49e7/content> (дата звернення: 01.06.2025).
16. A Simple Approach to Modeling Rural and Urban District Heating. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328295827\\_A\\_Simple\\_Approach\\_to\\_Modeling\\_Rural\\_and\\_Urban\\_District\\_Heating](https://www.researchgate.net/publication/328295827_A_Simple_Approach_to_Modeling_Rural_and_Urban_District_Heating) (дата звернення: 01.06.2025).
17. Sizing of district heating systems based on smart meter data: Quantifying the aggregated domestic energy demand and demand diversity in the UK. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10089142/1/Wang%20Manuscript%20Final.pdf> (дата звернення: 01.06.2025).
18. Statistical Modelling of Individual Substations in a District Heating System. URL: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8949358&fileId=8949370> (дата звернення: 01.06.2025).

**Ivanyuta O., Gumeniuk L.**

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

#### CLASSIFICATION OF APPROACHES AND METHODS FOR MODELING INDIVIDUAL HEAT POINTS

*The paper analyzes typical operating schemes of individual heating units. It has been established that individual heating units ensure efficient distribution of thermal energy between heating, ventilation, and hot water supply systems by adapting the parameters of the heat carrier to the needs of a particular building, regardless of the modes of the centralized network. Dependent and independent connection schemes, their advantages and disadvantages are analyzed. Approaches to mathematical, physical, and empirical modeling of individual heating points (IHP) are considered. Modeling is an important tool for analyzing and optimizing various systems, particularly in heat supply. The choice of modeling method depends on the specifics of the task, available resources, and the required accuracy of the results. Mathematical models are effective for solving problems where speed of calculation is important, but they may be less accurate than physical models. Physical models provide high accuracy due to their detailed description of processes, but require significant computing power. Empirical modeling allows*

*working with real data, but the accuracy of such models depends on the quality and volume of available information.*

**Keywords:** *individual heating units, connection diagrams, modeling.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
16.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 004.021

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-10

Камєнєва Ю. В.<sup>1</sup>, Федосов С. А.<sup>2</sup>, Новосад О. В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## ЦИФРОВІ ФІЛЬТРИ У СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Вибір і проектування цифрових фільтрів проводиться з урахуванням специфіки застосування і технічних обмежень. Широкого застосування у системах цифрової обробки сигналів знайшли цифрові фільтри: зі скінченною імпульсною характеристикою (FIR-фільтри) і з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR-фільтри). Існує багато методів проектування FIR-фільтрів, і деякі з поширених включають техніку віконного зважування. Поширені віконні функції включають вікна Геммінга, Ханнінга та Блекмана. Для проектування FIR-фільтрів можуть використовуватися і методи оптимізації, такі як алгоритм Паркса-Макклеллана (алгоритм обміну Ремеза). Класичними методами проектування IIR-фільтрів є проектування Баттерворта, Чебишева та еліптичні (Кауера), кожен з яких пропонує різні підходи щодо характеристик частотної реакції фільтра.

Залежно від вимог, можливим є використання фільтра будь-якого типу. Таким чином, вибір між IIR- і FIR-фільтрами залежить від конкретних потреб і використання. FIR-фільтри зазвичай застосовують, коли вирішальне значення мають лінійна фаза та стабільність, тоді як IIR-фільтри – для обчислювальної ефективності в обробці реального часу та в системах з менш жорсткими вимогами до фази.

**Ключові слова:** цифровий фільтр, імпульсна характеристика, FIR-фільтр, IIR-фільтр, проектування, алгоритми оптимізації.

**Постановка проблеми.** Підходи до вибору і проектування цифрових фільтрів проводиться з урахуванням специфіки застосування і технічних обмежень. Класифікація таких фільтрів базується за різними критеріями і включає різні типи, зокрема: цифрові фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою (англ. *Finite Impulse Response filter* – FIR-фільтри) і цифрові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (англ. *Infinite Impulse Response filter* – IIR-фільтри) [1-3]. Ряд сигналів, особливо ті, що отримуються від різних промислових датчиків, значною мірою залежать від збереження лінійної фазової характеристики для утримання дуже важливих даних. У цьому випадку саме цією важливою характеристикою повинен керуватися аналіз при визначенні найбільш оптимального типу цифрового фільтра для конкретного сигналу. Тому, коли важливими є лінійні фазові характеристики, FIR-фільтри є кращими завдяки їх вищому порядку та більшій складності. Навпаки, якщо важлива лише частотна характеристика, IIR-цифрові фільтри є практичнішим вибором, оскільки вони мають нижчі порядки, що призводить до меншої складності та легшої реалізації. Таким чином, стратегічний вибір підходів до вибору і проектування фільтрів, з урахуванням специфіки застосування та технічних обмежень, є ключовим чинником успішної реалізації цифрових фільтрів з високою продуктивністю та ефективністю.

**Аналіз останніх досліджень.** Огляд [4] підтвердив, що ефективність проектування цифрових фільтрів значною мірою залежить від вибору методології, оптимізаційних стратегій та архітектурних рішень. FIR-фільтри з лінійною фазовою характеристикою, зокрема у поєднанні з ведичним множником або деревом Уоллеса, демонструють вищу продуктивність порівняно з традиційними методами, особливо в додатках із високими вимогами до фазової лінійності. Проектування на основі множника Бута забезпечує баланс між швидкодією і апаратною складністю, застосування CLA-модифікацій відкриває нові можливості для високошвидкісної обробки сигналів в критичних галузях, таких як авіація. Алгоритми оптимізації, зумовлені природними процесами, сприяють гнучкому та ефективному налаштуванню параметрів фільтрів, знижуючи потребу в ресурсомістких ручних розрахунках.

У контексті цифрової обробки сигналів проведено [5] комплексний огляд та аналіз сучасних підходів, тенденцій і методів у проектуванні цифрових фільтрів. Вивчено роль алгоритмів оптимізації, апаратних реалізацій на FPGA та ASIC, а також вагомих специфічних вимог окремих застосувань у виборі й розробці цифрових фільтрів.

Важливими характеристиками фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою (FIR-фільтрів) є лінійна фазова характеристика, обробка фільтрів вищого порядку, а також висока стабільність [6]. Фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR-фільтри) є фільтрами нижчого порядку, мають нелінійну фазову характеристику та можливість нестабільності отриманого цифрового фільтра.

**Мета роботи.** Метою роботи було провести комплексний огляд та аналіз сучасних підходів і методів у розробці та проектуванні цифрових фільтрів у системах цифрової обробки сигналів, дослідити роль оптимізаційних алгоритмів, і специфічних вимог окремих застосувань (обробка аудіо, зображень, комунікаційні та енергетичні системи) у виборі та розробці цифрових фільтрів.

**Викладення основного матеріалу.** Фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою (FIR-фільтр) є класом цифрових фільтрів, що використовуються в обробці сигналів. «Скінченна імпульсна характеристика» означає, що реакція виходу фільтра на вхід має скінченну тривалість (рис. 1), тобто після подачі вхідного сигналу, вихід FIR-фільтра досягне нуля за скінченну кількість відліків.

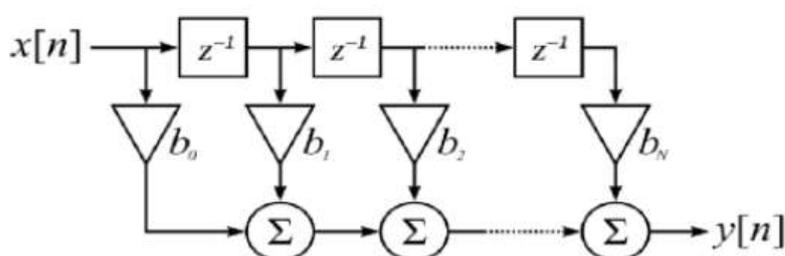


Рисунок 1 – Блок-схема FIR-фільтра [7]

Загальна формула або рівняння FIR-фільтра виглядає наступним чином:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M h[k] \cdot x[n-k], \quad (1)$$

де  $y[n]$  – вихідний сигнал у дискретний момент часу  $n$ ,  $x[n]$  – вхідний сигнал у момент часу  $n$ ,  $h[k]$  – коефіцієнти фільтра,  $M$  – порядок фільтра, що представляє кількість відводів або коефіцієнтів.

Проектування FIR-фільтра вимагає визначення коефіцієнтів фільтра для досягнення необхідної частотної характеристики. Існує багато методів проектування FIR-фільтрів, і деякі з поширених включають техніку віконного зважування – бажана частотна характеристика множиться на віконну функцію в часовій області для отримання коефіцієнтів фільтра. Поширені віконні функції включають вікна Геммінга, Ханнінга та Блекмана (рис. 2).

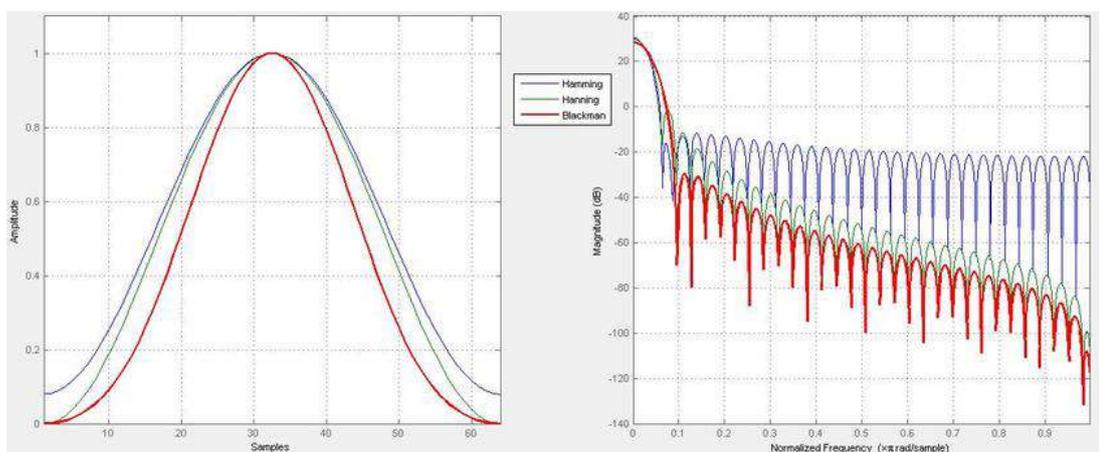


Рисунок 2 – (а) Часова область, (б) частотна область

Метод частотної вибірки визначає необхідну частотну характеристику на певних рівнях частоти, а потім використовують обернене перетворення Фур'є необхідної частотної характеристики для визначення коефіцієнтів фільтра. Для проектування FIR-фільтрів

можуть використовуватися і методи оптимізації, такі як алгоритм Паркса-Макклеллана (алгоритм обміну Ремеза). Метою цього методу є зменшення похибки між реальною та бажаною частотними характеристиками. Метод найменших квадратів: тут мінімізуються похибки в сумі квадратів між реальною та необхідною частотними характеристиками.

ІІР-фільтр – це цифровий фільтр, що використовується для обробки сигналів. Термін «нескінченна імпульсна характеристика» відображає те, що реакція виходу фільтра на вхід може нескінченно тягнутися. Загальна рівняння ІІР-фільтра задається як:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b[k] \cdot x[n-k] - \sum_{k=0}^M a[k] \cdot y[n-k], \quad (2)$$

де  $y[n]$  – вихідний сигнал у дискретний момент часу  $n$ ,  $x[n]$  – вхідний сигнал у момент часу  $n$ ,  $b[k]$  – коефіцієнти прямої зв'язку (чисельник),  $a[k]$  – коефіцієнти зворотного зв'язку (знаменник),  $N$  – порядок чисельника,  $M$  – порядок знаменника.

Класичними методами проектування ІІР-фільтрів є проектування Баттерворта, Чебишева та еліптичні (Кауера), кожен з яких пропонує різні підходи щодо характеристик частотної реакції фільтра (рис. 3). Цифрові інструменти проектування та програмне забезпечення часто використовують алгоритми оптимізації для знаходження коефіцієнтів, які відповідають заданим критеріям проектування.

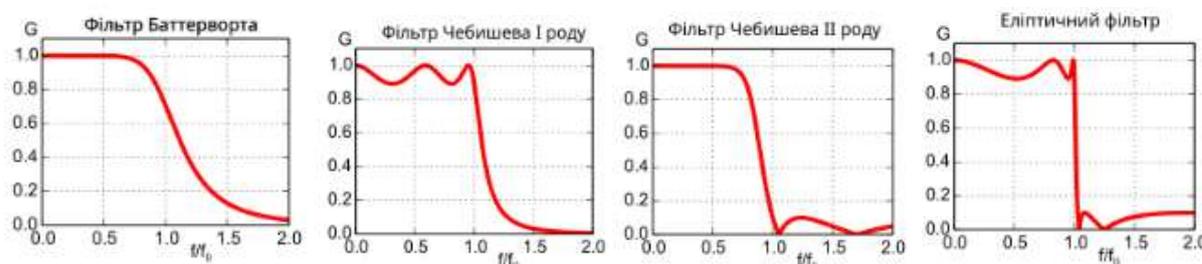


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнта передачі за амплітудою ( $G$ ) фільтра від нормованої частоти ( $f/f_0$ )

Одним із застосувань FIR-фільтрів є досягнення лінійної фазової характеристики, що є дуже важливим для збереження фазових співвідношень сигналів. Ця властивість особливо цінна при обробці аудіо та зображень. FIR-фільтри є внутрішньо стабільними, що робить їх проектування та реалізацію більш простими в цьому відношенні. FIR-фільтри пропонують більшу гнучкість у досягненні довільних частотних характеристик, що робить їх придатними для застосувань зі специфічними та точними вимогами в частотній області. Крім того, FIR-фільтри не мають петлі зворотного зв'язку, що усуває недоліки щодо стабільності та потенційних проблем з нестабільністю, які можуть виникнути в ІІР-фільтрах.

При обробці аудіо FIR-фільтри є найбільш бажаними, так як володіють лінійною фазовою характеристикою. ІІР-фільтри можуть бути кращими в комунікаційних системах, де критично важливі ефективність і обробка в реальному часі, а також у системах керування. Залежно від вимог, можливим є використання фільтра будь-якого типу. Таким чином, вибір між ІІР- і FIR-фільтрами залежить від конкретних потреб і використання. FIR-фільтри зазвичай застосовують, коли вирішальне значення мають лінійна фаза та стабільність, тоді як ІІР-фільтри – для обчислювальної ефективності в обробці реального часу та в системах з менш жорсткими вимогами до фази (рис. 4).

Незважаючи на широке використання FIR-фільтрів, існує низка викликів, пов'язаних з їх проектуванням. Однією з головних проблем є відсутність універсальних і ефективних методів, які дозволяють створювати фільтри з оптимальними характеристиками. Зокрема, важливим завданням є мінімізація кількості ненульових коефіцієнтів фільтра, оскільки це дозволяє зменшити витрати ресурсів при реалізації фільтра у цифровій системі. Розробляються нові методи оптимізації структури фільтрів, що враховують ці вимоги.

Сьогодні фільтри повинні забезпечувати ефективну обробку великої кількості інформації в реальному часі. Це особливо актуально для таких даних, як текст, зображення, аудіо- та відеоінформація. Цифрові фільтри розробляються для роботи з сигналами у форматах 1D, 2D та 3D, залежно від сфери застосування. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні DSP-систем з високою продуктивністю, які здатні працювати з великим обсягом даних та забезпечувати високу точність обробки.

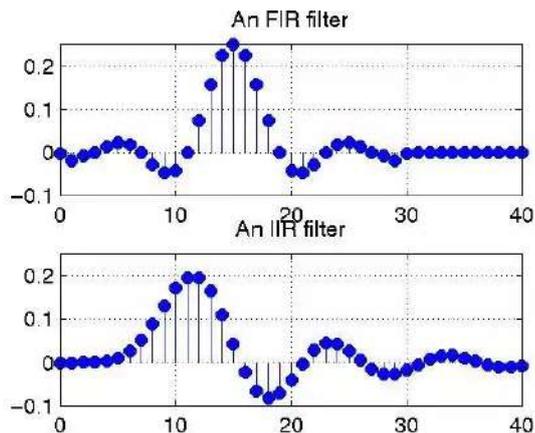


Рисунок 4 – FIR-фільтр, ІІР-фільтр

Аналіз сучасних публікацій у галузі цифрової фільтрації показує, що понад 53 % досліджень присвячено саме двовимірним фільтрам. Для одновимірних сигналів використовуються як FIR-, так і ІІР-фільтри, проте FIR-фільтри переважають через свої переваги, зокрема лінійну фазу та стійкість до змін. У процесі оптимізації коефіцієнтів фільтрів дедалі частіше застосовуються еволюційні методи, включаючи методи, що базуються на інтелекті рою, які демонструють високу ефективність.

Для реалізації цифрових FIR-фільтрів часто використовуються програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA) або спеціалізовані інтегральні схеми (ASIC) [8]. Одним із популярних інструментів для проектування таких пристроїв є середовище Xilinx ISE. Важливою перевагою FIR-фільтрів є їхня здатність забезпечувати лінійну фазову характеристику, що є суттєвою перевагою над ІІР-фільтрами.

У процесі розробки FIR-фільтрів використовуються різні структури: паралельні, послідовні та симетричні. Наприклад, фільтр, реалізований на основі дерева Уоллеса та множення Ведік, забезпечує найвищу частоту роботи, хоча і потребує більше апаратних ресурсів. Метод прямого доступу (DA) дозволяє реалізувати фільтр із меншою кількістю затримок, проте має обмеження у вигляді великої затримки обробки. Тому вибір архітектури залежить від конкретних вимог до швидкодії, енергоспоживання та площі чипа.

ІІР-фільтри мають свої переваги: вони дозволяють досягати високої селективності з меншою кількістю коефіцієнтів і мають нижчі затримки. Проте FIR-фільтри є стабільнішими, оскільки не мають зворотного зв'язку, а також можуть забезпечувати лінійну фазу. Завдяки цим особливостям FIR-фільтри переважно використовуються там, де важливо зберегти форму сигналу, наприклад у медичній діагностиці чи звукових системах.

Для оптимізації параметрів ІІР-фільтрів традиційно використовуються генетичні алгоритми, однак останнім часом дедалі частіше застосовується метод диференціальної еволюції (DE). Диференціальна еволюція (англ. *Differential Evolution*) – метод багатовимірної математичної оптимізації, що відноситься до класу стохастичних алгоритмів оптимізації (тобто працює з використанням випадкових чисел) і використовує деякі ідеї генетичних алгоритмів. Цей метод дозволяє точніше знаходити глобальні мінімуми у складних просторах рішень, а також має менше параметрів для налаштування. Завдяки цьому він швидше збігається та демонструє кращі результати при проектуванні складних фільтрів.

З розвитком технологій все більше фільтрів реалізується на базі систем-на-кристалі (SoC), які поєднують в собі обчислювальні ядра, пам'ять та програмовану логіку. Такі рішення активно використовуються у бездротовому зв'язку, оскільки забезпечують високу швидкодію, низьке енергоспоживання та невеликі затримки. У таких системах часто реалізуються адаптивні фільтри, наприклад, з використанням алгоритму LMS (найменших квадратів).

Проектування ІІР-фільтрів зазвичай базується на аналогових прототипах, які потім перетворюються у цифрову форму. Серед основних методів – перетворення Біллінера, імпульсна інваріантність та чисельні САД-методи. Важливо враховувати обмеження, пов'язані з точністю обчислень при використанні фіксованої коми, оскільки це може призводити до нестабільності фільтра та спотворення частотної характеристики.

Одним з ефективних способів проектування FIR-фільтрів є використання віконних методів, наприклад, Kaiser-вікна (рис. 5), яке забезпечує високу селективність. З поміж різних структур найбільш ефективною вважається пряма форма, яка характеризується меншою вартістю реалізації, компактністю та стійкістю до помилок квантування. Також зменшення бітності коефіцієнтів дозволяє прискорити обробку без значної втрати якості фільтрації.

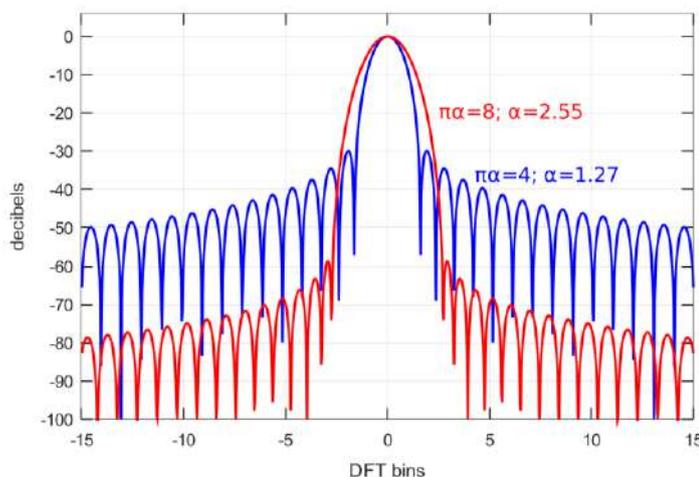


Рисунок 5 – Перетворення Фур'є двох вікон Кайзера

Цифрові FIR-фільтри активно застосовуються в таких галузях, як гідролокація, радіолокація, системи ракетного наведення та супутникова навігація. Основною перевагою цифрових фільтрів над аналоговими є гнучкість налаштування – зміна параметрів здійснюється програмно без потреби у зміні апаратної частини. Для моделювання та реалізації фільтрів широко використовуються пакети MATLAB, Simulink, а також Xilinx System Generator.

**Висновки.** Найефективнішим методом дослідження і реалізації цифрових фільтрів у сучасних системах виявляється використання FIR-фільтрів. Це обґрунтовується такими ключовими перевагами: лінійна фазова характеристика, що є критично важливою для збереження точності сигналу, особливо в аудіо- та медичних застосуваннях; стабільність, завдяки відсутності зворотного зв'язку; гнучкість у проектуванні, з можливістю досягати точних частотних характеристик за допомогою таких методів, як віконні функції (наприклад, вікно Кайзера), метод найменших квадратів та алгоритм Паркса-Макклеллана.

Незважаючи на те, що IIR-фільтри мають меншу складність і підходять для обробки в реальному часі (наприклад, у комунікаційних системах), вони поступаються в стабільності та фазовій точності. Це обмежує їх застосування у завданнях, де потрібна висока точність сигналу.

### Інформаційні джерела

1. Rusu C., Dumitrescu B. Iterative reweighted  $l_1$  design of sparse FIR filters. *Signal Processing*. 2012. Vol. 92, № 4. P. 905-911. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168411003483>
2. Wang H. A new separable two-dimensional finite impulse response filter design with sparse coefficients. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2015. Vol. 62, № 12. P. 2864-2873. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7305840/>
3. Ye W. B., Yu Y. J. Bit-level multiplierless FIR filter optimization incorporating sparse filter technique. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2014. Vol. 61, № 11. P. 3206-3215. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6848866/>
4. Каменєва Ю. В., Федосов С. А. Огляд та аналіз проектування цифрових фільтрів у цифровій обробці сигналів. *Global Trends in Science and Education : Proc. V Inter. Sci. Pract. Conf.*, June 2–4, 2025, Kyiv, Ukraine. Kyiv : SPC «Sci-conf.com.ua», 2025. P. 420–425. <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-2-4-06-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>
5. Каменєва Ю., Новосад О., Федосов С. Проектування цифрових фільтрів у обробці сигналів. *Problems of Computer Science, Software Modeling and Security of Digital Systems : Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf.*, June 09-11, 2025, Lutsk – Svityaz', Ukraine. Lutsk : Lesya Ukrainka Volyn Nat. Univ., 2025. P. 102–103. <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/256>

6. Jiang A., Kwan H. K., Zhu Y., Liu X., Xu N., Tang Y. Design of sparse FIR filters with joint optimization of sparsity and filter order. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2015. Vol. 62, № 1. P. 195-204. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2014.2354771>

7. Hossain K., Ahmed R., Haque A., Rahman M. T. A review of digital FIR filter design in communication systems. *International Journal of Science and Research*. 2021. Vol. 10, № 2. P. 1380–1391. <https://doi.org/10.21275/SR21221133619>

8. Damini Ku., Dandade C., Indurkar P. R. Review on design of digital FIR filters. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, № 2. P. 358-362.

**Kameneva Yu.<sup>1</sup>, Fedosov S.<sup>2</sup>, Novosad O.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Lesia Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

<sup>2</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

## DIGITAL FILTERS IN DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEMS

*The selection and design of digital filters is carried out taking into account the specifics of the application and technical limitations. Digital filters with finite impulse response (FIR filters) and infinite impulse response (IIR filters) have found wide application in digital signal processing systems. There are many methods for designing FIR filters, and some of the common ones include the window weighting technique. Common window functions include Hamming, Hanning, and Blackman windows. Optimization methods such as the Parks-McClellan algorithm (Remez exchange algorithm) can also be used to design FIR filters. The classic methods for designing IIR filters are Butterworth, Chebyshev, and elliptic (Cauer) designs, each of which offers different approaches to the frequency response characteristics of the filter.*

*Depending on the requirements, it is possible to use either type of filter. Thus, the choice between IIR and FIR filters depends on the specific needs and application. FIR filters are typically used when linear phase and stability are critical, while IIR filters are used for computational efficiency in real-time processing and in systems with less stringent phase requirements.*

**Keywords:** digital filter, impulse response, FIR filter, IIR filter, design, optimization algorithms.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
15.10.2025 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
24.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 006.06

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-11

Карась В. І., Драган А. П.

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛИВУ НАЦІОНАЛЬНОЇ І МІЖНАРОДНОЇ СТАНДАРТИЗАЦІЇ НА РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

У роботі досліджено сучасний стан та перспективи розвитку ринку електромобілів в Україні й світі. Визначено основні переваги електротранспорту – екологічні, соціально-психологічні, інноваційні, енергетичні та економічні. Проведено аналіз динаміки зростання кількості електромобілів за останні п'ять років, показано, що в Україні їх кількість зросла більш ніж у 20 разів. Розглянуто чинні українські стандарти (ДСТУ EN IEC 61851-1:2021, ДСТУ 9222:2023, ДСТУ EN IEC 63110-1:2024, ДБН В.2.5-23:2025) та законодавчі ініціативи, спрямовані на розвиток зарядної інфраструктури. Окремо наведено нові європейські нормативи, зокрема Регламент AFIR, стандарти EN ISO 15118, оновлену директиву EPBD і технічні рекомендації SCALE. Зроблено висновок про необхідність прискорення гармонізації українських нормативних документів із європейськими стандартами для забезпечення сталого розвитку електромобільної галузі.

**Ключові слова:** стандартизація, електромобіль, електротранспорт, інфраструктура, стандарт.

**Вступ.** За останні роки кількість і номенклатура автомобілів з електричним рушієм постійно зростає досить швидкими темпами. Впровадження жорстких вимог щодо екологічності автомобілів веде до зростання складності та вартості автомобілів з двигуном внутрішнього згорання. Тому використання електродвигунів які значно екологічно безпечніші від двигунів внутрішнього згорання, є найбільш очевидною альтернативою і в подальшому їх частка на ринку постійно зростатиме.

**Постановка проблеми.** Кількість і номенклатура електромобілів в Україні останніми роками стабільно зростає, а це вимагає покращення та розвитку дорожньо-транспортної інфраструктури і зростання забезпеченості даної галузі новими стандартами та іншими нормативними документами, які можуть значно прискорити темпи розвитку електротранспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час, в Україні існує певна кількість державних стандартів, що стосуються виробництва і експлуатації електромобілів [12,14], проте загальний рівень стандартизації у цій галузі не можна вважати достатнім.

Зараз в Україні працює когорта учених, а саме Сергій Нараєвський, Наталя Ширяєва, Тамара Олешко, Юрій Марченко, Наталя Малиш та ін. [1,2,3,5], які займаються вивченням і аналізом ринку електромобілів та досліджують перспективи його розвитку. Основною прискорюючою складовою для розвитку галузі електромобілебудування є модернізація електричних батарей. Українські учені Олена Сухова, Леонід Іванов, Сергій Тарасов, Ірина і Георгій Серіковита та ін. [4], постійно займаються вивченням різних характеристик матеріалів які використовуються при виготовленні електробатарей, що впливають на ефективність, запас ходу, час зарядки і надійність роботи електромобіля.

У світі вчені з Університету Нового Південного Уельсу у Сідней (Австралія) створили протонний акумулятор з використанням тетраамінобензохінону. Науковці з Університету Макгіма (Канада) розробили натрій-іонний акумулятор, що на 30% легший за літій-іонний та ефективніший за характеристиками роботи.

Розробка нових матеріалів та створення різноманітних сплавів вимагає постійного розвитку випереджаючої стандартизації.

**Мета статті.** Метою даної роботи є аналіз забезпеченості стандартами галузі виробництва та експлуатації електромобілів, оцінка перспектив стандартизації у цій галузі та дослідження впливу розвитку електромобільного транспорту на впровадження нових науково-технічних розробок, екологічну та соціально-психологічну безпеку населення.

**Матеріал досліджень.** У сучасних умовах постійного збільшення кількості транспортних засобів дедалі більшої популярності набувають екологічно безпечні електромобілі. Такі авто рухаються завдяки електричній енергії, що надходить від акумуляторних батарей. До цієї

категорії часто відносять і гібридні автомобілі, які поєднують електродвигуни з традиційними двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на біопаливі, бензині чи дизелі.

Розвиток ринку електромобілів має низку важливих переваг:

- екологічний аспект: такі транспортні засоби сприяють покращенню стану довкілля, оскільки не викидають шкідливих газів і значно знижують рівень вуглецевих викидів.
- соціально-психологічний аспект: проста конструкція електромобіля робить його експлуатацію зручнішою, а технічне обслуговування — дешевшим і простішим. Завдяки рекуперативному гальмуванню знос гальмівної системи мінімальний. Крім того, електромобілі майже не створюють шуму, адже мають менше механічних вузлів, що генерують звуки під час руху.
- інноваційний аспект: електротранспорт є символом сучасності та технологічного прогресу. Його розвиток стимулює створення нових роботизованих систем, IT-рішень, зарядних станцій, а також розвиток технологій зберігання енергії й альтернативних джерел живлення.
- енергетичний та економічний аспект: розширення використання електромобілів сприяє енергетичній незалежності держави.

Виходячи з вище наведених корисних факторів та перспективних планів по усуненню недоліків у галузі електромобілебудування сформовано таблицю 1.

Таблиця 1 – Переваги і недоліки електромобілів

Переваги	Недоліки
Зменшення забруднення навколишнього середовища	Висока вартість у порівнянні з автомобілями з ДВЗ
Низький рівень шуму	Обмежений термін служби батарей (до 10 років)
Простота управління	Трудомісткий та повільний процес зарядки
Невеликі витрати на паливо (електроенергію) у порівнянні з двигуном внутрішнього згоряння	Повного заряду вистачає на відстань в середньому близько 400 км
Безпечність руху і простота конструкції	Зниження запасу ходу при похолоданні
Простий і надійний двигун з високим ККД	Складність утилізації батарей (наявність токсичних компонентів)
Автомобіль можна зарядити вдома (економлячи кошти на нічному тарифі та час на відвідування заправки)	Імовірність ураження електричним струмом (необхідний стандарт відключення акумуляторів при ДТП)
Менше витрат на технічне обслуговування та ремонт	Недостатньо навчених фахівців для проведення технічного обслуговування

Примітка: ККД - коефіцієнт корисної дії; ДТП - дорожньо-транспортна пригода; ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння.

В сучасному світі розвиток електромобілебудування, за останні п'ять років, набув шалених темпів зростання, за рахунок вимог екологічної безпеки навколишнього середовища, зростання інноваційних технологій в напрямку покращення ефективності роботи електробатарей (термін служби зріс в середньому до 10 років, швидкість зарядки скоротилась до 1 години), зменшення їх ціни та зростання довговічності. За даними Rho Motion продаж електромобілів у світі, за останні п'ять років, зріс більш ніж у три рази і на кінець 2024 року становив 17,1млн. штук.

Україна сьогодні є одним з світових лідерів за темпами росту ринку продажів електромобілів на душу населення. Станом на 1 січня 2025 року в Україні зареєстровано більше 139 тис. електрокарів (за даними Інституту дослідження авторинку), а за не повний рік, не зважаючи на війну і економічну кризу, їх кількість перевершила 160 тис. Протягом останніх 5 років кількість електромобілів зросла більш ніж у 20 разів (рисунок 1).

Аналізуючи графіки реалізації електромобілів і всіх інших транспортних засобів в Україні і світі за останні 5 років (див. рисунок 2), можна зробити висновок, що в нашій державі кількість придбаних автомобілів з електричним двигуном у процентному співвідношенні до загальної кількості реалізованих транспортних засобів, в останні роки постійно зростає і в процентному співвідношенні наближається до середньостатистичних світових показників. При цьому слід врахувати, що домінуюча частка електромобілів придбаних в Україні вже були у користуванні. Однією з основних перешкод для розвитку ринку електротранспорту в Україні є недостатнє нормативне врегулювання питань облаштування паркувальних місць і зарядних

станцій для електромобілів, а також відсутність належних дорожніх знаків та інфраструктурних стандартів.

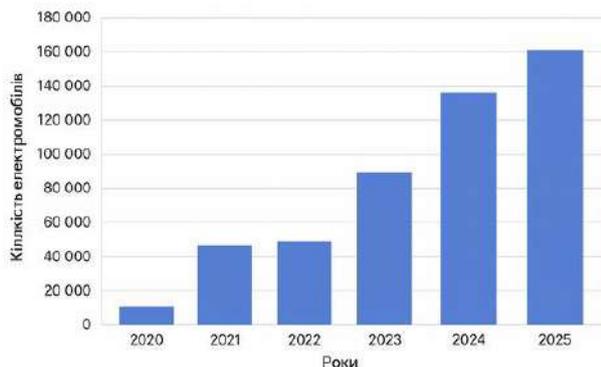


Рисунок 1 – Загальна кількість електромобілів зареєстрованих в Україні за останні 5 років

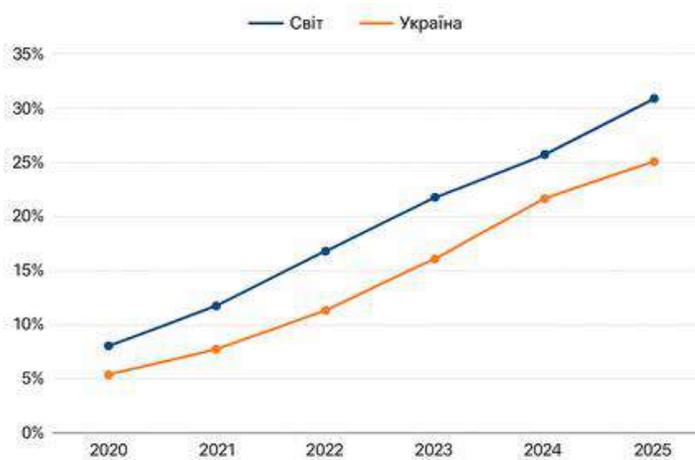


Рисунок 2 – Процентне співвідношення продажу електромобілів відносно загальної кількості зареєстрованих всіх автомобілів

Розв'язання цих проблем має відбуватися на державному рівні шляхом чіткого регулювання у законодавчих актах та нормативно-технічних документах, які встановлюють відповідні норми, вимоги та правила.

За останні роки було впроваджено кілька стандартів та законодавчих актів які додали динаміки ринку електромобілів:

1. ДСТУ EN IEC 61851-1:2021 – “Системи заряджання електричних транспортних засобів. Частина 1. Загальні вимоги”.

Цей стандарт є базовим документом для всієї галузі зарядної інфраструктури. Він визначає загальні технічні та безпекові вимоги до систем заряджання електромобілів, включно з характеристиками електроживлення, рівнями потужності, вимогами до ізоляції, захисту від ураження струмом, нагріву тощо. Окрім того, у ньому закладені основи класифікації зарядних режимів — від Mode 1 (повільна зарядка від побутової мережі) до Mode 4 (швидкі DC-зарядки).

В Україні цей стандарт гармонізований із європейським EN 61851 і є обов'язковим при сертифікації зарядного обладнання.

2. ДСТУ EN IEC 63110-1:2024 – “Протокол керування зарядною та розрядною інфраструктурою електромобілів”.

Цей сучасний стандарт описує цифрову взаємодію між зарядними станціями, енергомережами та операторами. Він регулює, як зарядні пункти обмінюються даними з центральними системами (наприклад, через OCPP – Open Charge Point Protocol), забезпечує віддалене керування, моніторинг, оплату та енергетичне балансування.

В Україні стандарт почали впроваджувати у 2024 році, що відкриває шлях до створення “розумних мереж зарядки” (smart grid) та інтеграції електромобілів у енергосистему.

3. ДСТУ 9222:2023 – “Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів”.

Цей документ зосереджується на пожежній безпеці під час проєктування, встановлення та експлуатації зарядних станцій. У ньому описано вимоги до вибору матеріалів, вентиляції, відстаней між обладнанням, системи автоматичного пожежогасіння та контролю температури. Також регламентуються дії персоналу у разі займання батареї або короткого замикання.

Стандарт є надзвичайно важливим для інженерів, забудовників та власників ТРЦ, оскільки дозволяє легалізувати проєкти зарядних станцій у будівлях.

#### 4. ДБН В.2.5-23:2025 – “Будівельні норми. Станції зарядки електромобілів”.

Це новий державний будівельний норматив, який визначає правила розміщення зарядних станцій у житлових, комерційних і громадських об’єктах.

Документ охоплює:

- вимоги до електроживлення та заземлення;
- мінімальні площі для паркомісць електромобілів;
- відстані між станціями;
- вимоги до освітлення, доступності та пожежного захисту.

Фактично, цей норматив створює юридичну основу для масового облаштування зарядної інфраструктури в містах України

5. Закон України №10405 (від 7.08.2019) «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів», дія якого почалась з 1 січня 2020 року [6]. Закон дозволяє:

- забезпечити захист прав водіїв транспортних засобів, оснащених електричними двигунами (одним чи декількома), на доступ до зарядних станцій для електромобілів;
- удосконалити та наблизити до європейських стандартів відносини у сфері забезпечення безпеки дорожнього руху;
- збільшити завантаженість роботи діючих зарядних станцій для електромобілів.

Цей закон сприяє розвитку ринку електромобілів і надає більше можливостей для подальшої розбудови інфраструктури та мережі зарядних станцій для електромобілів

Але процес впровадження стандартів все ще не встигає за потребами ринку.

На сьогодні відсутні єдині вимоги щодо мінімальної кількості паркомісць для електромобілів при будівництві нових ТРЦ, офісних чи житлових комплексів, позначення таких місць — використання символіки «EV» або відповідних дорожніх знаків, обмежень для неелектричних авто при зайнятті місць для зарядки (що потребує змін до ПДР). В ЄС це регулюється стандартами ISO 7010, EN 17186 (знаки та символи для електромобільної інфраструктури), тоді як в Україні вони ще не повністю імплементовані.

Інші нормативні напрями, що потребують оновлення, це зокрема стандарти, що стосуються експлуатації акумуляторів (утилізація, повторне використання) та вимоги до технічного обслуговування електромобілів.

Нові європейські стандарти та нормативи у сфері електромобілів (2023–2025 pp.):

1. Регламент AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) що встановлює обов’язкові вимоги до розвитку зарядної інфраструктури в ЄС. Для мережі TEN-T (основні автомагістралі):

- до кінця 2025 року – зарядні станції швидкої дії (мінімум 150 кВт) кожні 60 км;
- до кінця 2025 року – мінімальна потужність станції 400 кВт;
- до кінця 2027 року – мінімальна потужність станції 600 кВт.

Забезпечується безконтактна оплата, прозорість цін і сумісність між операторами.

2. Стандарти EN ISO 15118 (частини 1–5, 20). Регламентують цифрову комунікацію між електромобілем і зарядною станцією.

Основні нововведення:

- впровадження функції Plug & Charge – автоматична ідентифікація та оплата без карт чи додатків;
- підтримка двонапрямної зарядки (V2G – Vehicle-to-Grid), що дозволяє електромобілям повертати енергію в мережу;
- з 2025–2027 років вимоги стандарту стають обов’язковими для нових зарядних станцій у ЄС.

3. Оновлена директива EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Визначає вимоги до облаштування зарядних станцій у будівлях.

Основні положення:

- будівлі з 20 і більше паркомісцями мають бути оснащені принаймні однією зарядною точкою до 1 січня 2025 р;

– необхідно передбачати інфраструктуру для подальшого розширення мережі зарядок (електропроводка, місця під станції);

Поширюється на нові, реконструйовані, громадські та комерційні будівлі.

4. Технічні керівництва проєкту SCALE (Smart Charging Alignment for Europe). Містять рекомендації з впровадження “розумних” і двонапрямних систем зарядки.

Основні напрями:

– стандартизація закупівлі та експлуатації зарядних станцій з підтримкою V2X (Vehicle-to-Everything).

– інтеграція зарядної інфраструктури до енергомереж із використанням відновлюваних джерел енергії.

– єдині технічні принципи для взаємодії між енергокомпаніями, операторами зарядок і виробниками авто.

Як можна побачити рівень стандартизації даної галузі у європейських країнах випереджає український.

**Висновки.** Кількість електромобілів на ринку постійно зростатиме. Ця галузь є надзвичайно перспективною і буде стрімко розвиватися. В електромобільній галузі дуже швидко впроваджуються нові технології, що сприяє розвитку і модернізації виробництва на основі нових інноваційних розробок, що неможливо без випереджаючої стандартизації. Для підтримки темпів розвитку ринку електромобілів в Україні потрібно модернізувати і розширювати систему стандартів що позитивно вплине як на перспективу їх виготовлення, чи хоча б складання у нашій країні, так і на розвиток необхідної інфраструктури.

#### Інформаційні джерела

1. Длугопольський О. В. Розвиток ринку електромобілів у світі: вплив субсидій, цін на нафту та інновацій. *Social and Economic Research*. 2024. № 1(24). С. 67-79.

2. Нараєвський С. В. Посилення конкурентних позицій країн Азії на світовому автомобільному ринку [Електронний ресурс] / С. В. Нараєвський // *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 9. С. 46-53.

3. Олешко Т. І., Касіротська К. О. Сучасний стан і перспективи розвитку ринку електромобілів. *Бізнес Інформ*. 2020. №2. С. 480-485. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-2-480-485>.

4. Тарасов С. В., Сухова О. В., Іванов Л.А. Літій-іонні акумулятори для автомобільного транспорту // *Науково-виробничий журнал “Автошляховик України”*. Окремий випуск, грудень, 2023 р. С. 328-333.

5. Терлецька В. О. Стан і динаміка розвитку ринку автомобілів з електричним двигуном в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Економіка та управління. 2022. № 1. С. 114-124.

6. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів: Закон України від 11.07.2019 №2754-VIII.

7. Директиви Європейського Союзу 2003/96/ЄС «Про реструктуризацію системи Співтовариства з оподаткування продуктів енергії та електроенергії». (Офіційний вісник ЄС, L 283, 31 жовтня 2013 р., С. 51-70).

8. ДСТУ EN 60622:2016 Акумулятори та акумуляторні батареї, які містять лужні чи інші неокислотні електроліти. Герметизовані нікель-кадмієві призматичні одиночні акумулятори, що перезаряджаються (EN 60622:2003, IDT) [діє від 01.11.2016] Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 27с.

9. ДСТУ EN 60285:2016 Акумулятори та батареї лужні вторинні. Герметизовані нікель-кадмієві циліндричні одиночні акумулятори, що перезаряджаються (EN 60285:1994, IDT) [діє від 01.11.2016] Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 21с.

10. ДСТУ 4278:2019 Дорожній транспорт. Знаки номерні транспортних засобів. Загальні вимоги. Правила застосування. Національний стандарт України [діє від 30.01.2024] Київ: 2024. 33с.

11. ДСТУ4100:2021 Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. Національний стандарт України [діє від 01.11.2021] Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 195с.

12. ДСТУ EN 62192:2022 Робота під напругою. Ізоляційні канати (EN 62192:2009, IDT; IEC 62192:2009, IDT) [діє від 31.12.2023] Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 31с.

13. ISO 6469-1:2019 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS).

14. ISO 6469-2:2022 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures.

15. ISO 6469-3:2021(en) Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 3: Electrical safety.

16. ISO 20762:2018(en) Electrically propelled road vehicles – Determination of power for propulsion of hybrid electric vehicle.

17. ISO 23274-1:2019 Hybrid-electric road vehicles – Exhaust emissions and fuel consumption measurements – Part 1: Non-externally chargeable vehicles.

**Karas V.I., Drahan A.P.**

Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany agrotechnical institute»

### **RESEARCH ON THE IMPACT OF NATIONAL AND INTERNATIONAL STANDARDIZATION ON THE DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC VEHICLE INDUSTRY**

*The paper examines the current state and prospects for the development of the electric vehicle market in Ukraine and worldwide. The main advantages of electric transport are identified — environmental, socio-psychological, innovative, energy, and economic. The dynamics of electric vehicle growth over the past five years are analyzed, showing that in Ukraine their number has increased more than twentyfold. The study reviews current Ukrainian standards (DSTU EN IEC 61851-1:2021, DSTU 9222:2023, DSTU EN IEC 63110-1:2024, DBN V.2.5-23:2025) and legislative initiatives aimed at developing charging infrastructure. Additionally, new European regulations are outlined, including the AFIR Regulation, EN ISO 15118 standards, the updated EPBD Directive, and the SCALE technical guidelines. The paper concludes that accelerating the harmonization of Ukrainian regulatory documents with European standards is essential to ensure sustainable development of the electric vehicle industry.*

**Keywords:** *standardization, electric vehicle, electric transport, infrastructure, standard.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
12.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
10.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 681.21.088

DOI 10.36910/10.36910/6775–2313–5352–2025–27–12

**Кепещук Т. В., Малісевич В. В., Пастущин Л. Б., Мислицький В. В.**

Державне підприємство «Івано–франківський науково–виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

**МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ АВТОКЛАВІВ ТА СТЕРИЛІЗАТОРІВ**

*Метою даної роботи є розроблення процедури калібрування автоклавів та стерилізаторів парових, які застосовуються для стерилізації вологим теплом об'єктів та виробів у закладах медичної, харчової та інших галузей, з метою знищення усіх форм життєздатних мікроорганізмів. Процедура (методика) калібрування стерилізаторів встановлює методи й засоби їх калібрування, що передбачає, серед іншого, складання модельного рівняння (математичної моделі), формування бюджету і оцінювання невизначеності результатів вимірювання. Забезпечення єдності та метрологічної простежуваності результатів вимірювання – одне з основних завдань калібрувальних лабораторій під час калібрування засобів вимірювальної техніки та випробувального обладнання. У роботі наведено методи та засоби, процедуру проведення калібрування автоклавів та стерилізаторів парових, визначення метрологічних характеристик вказаних засобів вимірювальної техніки, складання математичної моделі, формування бюджету і оцінювання невизначеності вимірювання за результатами калібрування. Наведений матеріал надає практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення нестандартизованих методик калібрування обладнання, зокрема, автоклавів та стерилізаторів парових.*

**Ключові слова:** автоклави та стерилізатори парові, калібрувальна лабораторія, методика калібрування, невизначеність вимірювань.

**Постановка проблеми.** Автоклави та стерилізатори парові (далі за текстом – стерилізатори) є критично важливим обладнанням у медичній, фармацевтичній, харчовій промисловості, лабораторній та косметологічній практиці. Ефективність стерилізації безпосередньо залежить від точності контролю основних параметрів: температури насиченої пари, тиску в робочій камері. Для забезпечення ефективності, безпеки та надійності стерилізаційного циклу необхідним є регулярне визначення метрологічних характеристик стерилізаторів, зокрема їх калібрування.

Калібрування еталонів, засобів вимірювальної техніки, випробувального та допоміжного обладнання (далі за текстом – обладнання) здійснюється калібрувальними лабораторіями.

Загальні вимоги щодо компетентності, неупередженості та стійкого функціонування калібрувальних лабораторій встановлюються національним стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [1], який ідентичний європейському та міжнародному документу EN ISO/IEC 17025:2107 та ISO/IEC 17025:2107. Також, акредитовані калібрувальні лабораторії при провадженні своєї діяльності також повинні керуватися міжнародними документами: EA–4/02 М, ІЛАС–G8:09, ІЛАС–P10:07, ІЛАС P14:01, ІЛАС–P14:09 [2, 3, 4, 5, 6] та документами Національного агентства з акредитації України: ЗД–08.00.09, ЗД–08.00.29, ІН–08.02.05 [6,7,8].

Калібрування обладнання здійснюється відповідно до методик калібрування. Відповідно до ДСТУ EN ISO/IEC 17025 якщо замовник не вказує метод (методику), який необхідно застосовувати під час калібрування, то рекомендується застосовувати відповідні методи (методики), опубліковані у міжнародних, регіональних чи національних стандартах, або видані авторитетними технічними організаціями, або видані у відповідній науковій літературі чи журналах, або ті, що зазначаються виробником обладнання. Також, згідно положень вказаного стандарту калібрувальні лабораторії можуть розробляти власні (нестандартизовані) методики калібрування обладнання з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування).

На даний час в Україні для більшості еталонів, засобів вимірювальної техніки, випробувального та допоміжного обладнання відсутні методики калібрування, що встановлені у національних стандартах, у зв'язку з цим питання щодо розроблення таких методик є досить актуальним.

**Аналіз останніх досліджень.** У калібрувальному центрі ДП «Івано–франківськстандартметрологія» розроблені методики калібрування еталонів, засобів

вимірювальної техніки, випробувального та допоміжного обладнання за різними видами та підвидами вимірювань.

Враховуючи те, що в Україні відсутні стандартизовані методики калібрування автоклавів та стерилізаторів парових, були розроблені методики калібрування цього обладнання. Вказані методики розроблялися з урахуванням вимог міжнародних методичних документів EA-4/02 M, DKD-R 5-7, Calibration Guide EURAMET cg-20 Version 4.0 [2,9,10] (в частині процедури оцінювання невизначеності вимірювань).

Загалом підходи щодо побудови, викладення та змісту методик калібрування, проблемні питання, що виникають при їх розробленні, розглянуто у публікації [11].

Основними операціями, які наведені у методиках калібрування, є зовнішній огляд, опробування, визначення метрологічних характеристик, складання математичної моделі вимірювань, опрацювання результатів калібрування і оцінювання невизначеності вимірювань [12, 13, 14].

**Мета роботи** – розроблення процедури (методики) калібрування обладнання, зокрема стерилізаторів, що передбачає, окрім іншого, складання математичної моделі, формування бюджету і оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

#### **Основний текст статті.**

Розглянемо основні операції при калібруванні автоклавів та стерилізаторів парових.

Перед проведенням калібрування проводиться контроль умов калібрування. Температура повітря в приміщенні повинна бути  $(20 \pm 5)$  °С, відносна вологість повітря – не більше 80%, атмосферний тиск від 86 кПа до 106,7 кПа; Для обладнання, які працює від мережі змінного струму контролюються наступні умови:

- напруга живлення мережі змінного струму –  $(230 \pm 22)$  В;
- частота мережі живлення –  $(50 \pm 1)$  Гц.

При проведенні калібрування стерилізаторів необхідно враховувати потенційно небезпечні фактори при їх роботі. Це високий тиск, висока температура та гаряча пара.

Для проведення калібрування стерилізаторів застосовується наступні засоби:

- еталони: високотемпературні давачі–реєстратори температури та тиску;
- засоби вимірювальної техніки: барометр, гігрометр психрометричний, мультиметр;
- допоміжне обладнання: програмне забезпечення, електронно–обчислювана машина.

Перед проведенням калібрування еталони, засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання, що застосовуються для калібрування, а також стерилізатори, що підлягають калібруванню, повинні бути приведені в робочий стан відповідно з експлуатаційними документами (далі за текстом – ЕД), і витримані протягом не менше 2–х годин на робочому місці.

Під час проведення зовнішнього огляду стерилізаторів повинна бути встановлена відсутність механічних пошкоджень трубопроводів, запірної арматури; механічних пошкоджень штуцерів і їх ущільнень та інших дефектів, які можуть погіршувати експлуатаційні характеристики і перешкоджати їх роботі.

Також необхідно перевірити наявність:

- затискача захисного заземлення та знаку захисного заземлення на корпусах електрообладнання стерилізатора;
- огороження або теплоізоляції поверхонь устаткування с температурою більше 45 °С;
- на шкалах манометрів відмітки (червоного кольору) максимально допустимого значення робочого тиску;
- пломбування запобіжного клапану (при наявності) та діючого терміну опосвідчення;
- діючого терміну опосвідчення посудин стерилізатора, що працюють під тиском.

При опробуванні та перевірці параметрів безпеки стерилізаторів необхідно:

- провести перевірку функціонування запірної арматури стерилізатора, шляхом опробування перемикачів кранів (клапанів), яке повинно бути повним, плавним, без допомоги додаткових важелів;

– перевірити функціонування стерилізатора на можливість відтворення та підтримання режимів та умов стерилізації відповідно до експлуатаційної документації;

– при робочому тиску пари перевірити герметичність ущільнення дверей і кришок, з'єднань контрольно–вимірювальних приладів, трубопроводів, арматури. На з'єднаннях має бути відсутнє паріння чи підтікання;

– у робочому стані провести перевірку функціонування пристроїв блокування, шляхом введенням примусових відхилень від заданих значень по температурі та тиску під час циклу стерилізації відповідно до ЕД;

– провести перевірку функціонування попереднього видалення повітря зі стерилізаційної камери, шляхом опробування пристрою видалення повітря із стерилізаційної камери многократним чергуванням впусків та випусків пари або вакуумуванням (при наявності в конструкції стерилізатора системи вакуумної відкачки).

При виявленні несправностей, що заважають подальшому проведенню калібрування або несуть загрозу персоналу, калібрування припиняється.

Під час проведення калібрування стерилізаторів визначаються наступні метрологічні характеристики: температура стерилізації; робочий тиск пари в стерилізаторі, що нормуються відповідно до ДСТУ EN 14180 [15]. Також формується бюджет та оцінюється невизначеність результатів вимірювання.

Давачі–реєстратори температури (точки 2,3,4,5), в кількості п'яти штук, рівномірно розташовуються у робочому об'ємі стерилізатора. У геометричному центрі робочого об'єму розташовується контрольний датчик (1к). Давачів–реєстратор тиску (Р) розміщується в будь-якій точці робочого об'єму стерилізатора (рис. 1).

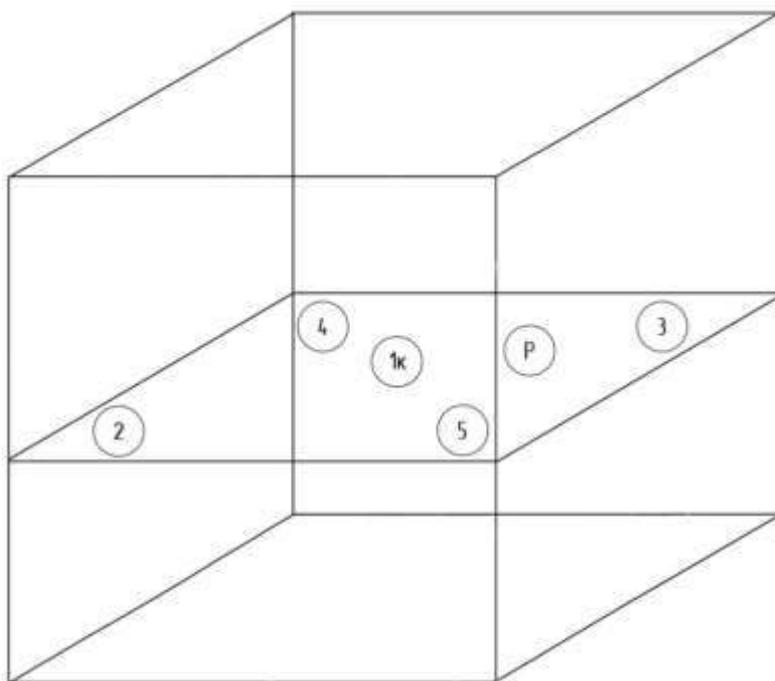


Рисунок 1 – Розміщення давачів–реєстраторів температури та тиску у робочому об'ємі стерилізатора

Відповідно до програми стерилізації (програмне забезпечення – напр. Madge Tech 4 Data Logger Software) встановлюється період реєстрації даних для всіх давачів–реєстраторів. Цей період встановлюється таким чином, щоб за час виконання програми стерилізації було здійснено не менше 10 вимірювань.

Після завершення програми стерилізації за допомогою програмного забезпечення зчитуються дані з давачів–реєстраторів. Ця інформація застосовується як первинні дані для опрацювання результатів вимірювання та оцінювання невизначеності вимірювання. Опрацювання результатів вимірювання проводиться з урахуванням вимог [2, 9, 10].

**Оцінювання невизначеності відтворення температури.** Температура, відтворювана в робочому об'ємі, визначається як середнє значення температури, виміряне еталоном в контрольній точці за формулою:

$$\bar{T}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

де  $\bar{T}_e$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання температури еталоном, °С;

$T_i$  –  $i$ -значення температури, виміряне еталономним реєстратором температури в контрольній точці, °С;

$n$  – кількість вимірювань.

Середня температура, відтворювана в робочому об'ємі, визначається за формулою :

$$\bar{T}_\kappa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (2)$$

де  $\bar{T}_\kappa$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання температури еталоном в робочому об'ємі, °С;

$T_{ij}$  –  $i$ -значення температури, виміряне еталономним  $j$ -термометром, °С.

Нерівномірність температури в робочому об'ємі визначається як максимальне значення різниці між середньою температурою, відтворюваною в робочому об'ємі, та температурою кожного окремого вимірювання еталону в усіх точках робочого об'єму:

$$T_n = \text{MAX}(\bar{T}_\kappa - T_{ij}) \quad (3)$$

де  $T_n$  – нерівномірність температури в робочому об'ємі, °С.

Нестабільність у часі температури в контрольній точці визначається як максимальне значення різниці між відтворюваною температурою та температурою кожного окремого вимірювання еталону за період спостережень в контрольній точці:

$$T_{cm} = \text{MAX}(\bar{T}_e - T_{ij}) \quad (4)$$

де  $T_{cm}$  – нестабільність в часі температури в контрольній точці, °С;

Відхилення відтвореної температури, визначається як різниця між номінальним значенням температури та вимірювання температури еталоном:

$$\Delta T_{\text{відм}} = T_{\text{ном}} - \bar{T}_e \quad (5)$$

де  $\Delta T_{\text{відм}}$  – відхилення відтворення температури від номінальної в кожній точці калібрування, °С;

$T_{\text{ном}}$  – номінальне значення температури, °С;

$\bar{T}_e$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання температури еталоном, °С.

Значення відтвореної температури визначається за формулою:

$$T = (\bar{T}_e + \sum_{\text{нопр.ем.}} T_{\text{нопр.ем.}}) = (\bar{T}_e + \delta\bar{T}_e + \delta T_{\text{ем.Т}} + \delta T_{\text{см.}} + \delta T_n) \quad (6)$$

де  $T$  – відтворене значення температури, °С;

$\sum_{\text{нопр.ем.}} T_{\text{нопр.ем.}}$  – сума поправок еталоного вимірювального каналу температури, °С;

$\delta T_{\text{ем.Т}}$  – поправка еталону температури при температурі калібрування, °С;

$\delta\bar{T}_e$  – поправка, що враховує розсіювання результатів вимірювання температури еталоном, °С;

$\delta T_n$  – температурна поправка, що враховує нерівномірність температури в робочому об'ємі, °С;

$\delta T_{\text{см.}}$  – температурна поправка, що враховує коливання температури протягом часу вимірювання (нестабільність), °С.

Вхідні величини розглядаються як некорельовані.

Результатами в кожній точці калібрування є:

– середнє арифметичне значення результатів вимірювання відтвореної температури в стерилізаторі еталоном розраховується за формулою 1;

– відхилення температури відтвореної в робочому об'ємі розраховується за формулою 4;

– розширена невизначеність відтворення температури розраховується за формулою 13.

Крім того, у всьому діапазоні температур розраховуються:

– нерівномірності температури в робочому об'ємі розраховується за формулою (2);

– нестабільність температури в контрольній точці розраховується за формулою (3)

Сумарна стандартна невизначеність відтворення температури в кожній точці калібрування розраховується за формулою:

$$u(T) = \sqrt{u^2(\bar{T}_e) + u^2(\delta T_{em.T}) + u^2(\delta T_{cm}) + u^2(\delta T_n)} \quad (7)$$

де  $u(T)$  – сумарна стандартна невизначеність результату вимірювання температури, °С;

$u(\bar{T}_e)$  – стандартна невизначеність результату вимірювання температури еталоном внаслідок розсіювання результатів, °С;

$u(\delta T_{em.T})$  – стандартна невизначеність вимірювання еталоном при заданій температурі, °С;

$u(\delta T_n)$  – стандартна невизначеність через нерівномірність температури в робочому об'ємі, °С;

$u(\delta T_{cm})$  – стандартна невизначеність через нестабільність температури в контрольній точці, °С.

За отриманими значеннями проведених вимірювань температури розраховуються:

– середньоквадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірювання температури еталоном за формулою:

$$S(\bar{T}_e) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_{ij} - \bar{T}_e]^2}{n-1}} \quad (8)$$

– стандартна невизначеність відхилення середнього значення результату вимірювання температури еталоном за формулою:

$$u(\bar{T}_e) = \frac{s(\bar{T}_e)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_e)^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

Стандартна невизначеність вимірювання температури еталоном визначається за формулою:

$$u(\delta T_{em.T}) = \frac{U(\delta T_{em.T})}{2} \quad (10)$$

де  $U(\delta T_{em.T})$  – розширена невизначеність вимірювання температури еталоном (із сертифікату калібрування), °С.

Стандартна невизначеність, яка враховує нерівномірність температури в робочому об'ємі, для кожної конкретної температури, розраховується за формулою:

$$u(\delta T_n) = \frac{T_n}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

де  $T_n$  – нерівномірність температури в робочому об'ємі, °С.

Як результат приймається максимальне значення невизначеності у всьому діапазоні вимірювання температур.

Стандартна невизначеність, яка враховує нестабільність температури в контрольній точці, для кожної конкретної температури, розраховується за формулою:

$$u(\delta T_{cm}) = \frac{T_{cm}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

де  $T_{cm}$  – нестабільність температури в контрольній точці, °С.

Як результат приймається максимальне значення невизначеності у всьому діапазоні вимірювання температур.

За формулою (7) розраховуємо сумарну стандартну невизначеність відтворення температури в робочому об'ємі.

Розширена невизначеність відтворення температури в робочому об'ємі стерилізатора розраховується за формулою:

$$U(T) = k \cdot u(T) \quad (13)$$

де  $U(T)$  – розширена невизначеність відтворення температури, °C;

$k$  – коефіцієнт охоплення,  $k = 2$  при нормальному законі розподілу і довірчій ймовірності 95 %.

На основі отриманих даних формується бюджет невизначеності відтворення температури в робочому об'ємі стерилізатора (таблиця 1).

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності відтворення температури в робочому об'ємі стерилізатора

Величина $X_i$ , °C	Оцінка $x_i$ , °C	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Розподіл	Коефіцієнт чутливості $c_i$	Внески в сумарну стандартну невизначеність $u(y)$ , °C
$\bar{T}_e$	значення	–	–	–	–
$\delta\bar{T}_e$	0	$\sqrt{s(\bar{T}_e)}$	Нормальний	1	$u(\bar{T}_e)$
$\delta T_{em.T}$	0	$\frac{U(\delta T_{em.T})}{2}$	–	1	$u(\delta T_{em.T})$
$\delta T_{cm}$	0	$\frac{T_{cm}}{\sqrt{3}}$	Прямокутний	1	$u(\delta T_{cm})$
$\delta T_n$	0	$\frac{T_n}{\sqrt{3}}$	Прямокутний	1	$u(\delta T_n)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Рівень довіри	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
$T$	значення	$u(T)$	0,95	$k$	$U(T)$

**Оцінювання невизначеності відтворення тиску.** Тиск, відтворюваний в робочому об'ємі, визначається як середнє значення тиску, вимірюване еталоном, за формулою:

$$\bar{P}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (14)$$

де  $\bar{P}_e$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання тиску еталоном, МПа;

$P_i$  –  $i$ -значення тиску, виміряне еталоном, МПа;

$n$  – кількість вимірювань.

Відхилення відтвореного тиску, визначається як різниця між номінальним значенням заданого тиску та вимірним еталоном за формулою:

$$\Delta P_{e\delta m} = P_{ном} - \bar{P}_e \quad (15)$$

де  $\Delta P_{e\delta m}$  – відхилення відтворення тиску від номінального в кожній точці калібрування, МПа;

$P_{ном}$  – номінальне значення тиску, МПа;

$\bar{P}_e$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання тиску еталоном, МПа.

Значення відтвореного тиску визначається за формулою:

$$P = (\bar{P}_e + \sum_{nonp.em.} P) = (\bar{P}_e + \delta\bar{P}_e + \delta P_{em.p}) \quad (16)$$

де  $P$  – відтворене значення тиску, МПа;

$\sum P_{\text{нопр.ет.}}$  – сума поправок еталонного вимірювального каналу тиску, МПа;

$\delta P_{\text{ем.р}}$  – поправка, що враховує невизначеність результату вимірювання тиску еталоном, МПа;

$\overline{\delta P_e}$  – поправка, що враховує розсіювання результатів вимірювання тиску еталоном, МПа;

Результатами в кожній точці калібрування є:

– середнє арифметичне значення результатів вимірювання відтвореного тиску в стерилізаторі еталоном розраховується за формулою 14;

– відхилення тиску відтвореного в робочому об'ємі розраховується за формулою 15;

– розширена невизначеність відтворення тиску розраховується за формулою 21.

Сумарна стандартна невизначеність результату вимірювання тиску в кожній точці калібрування визначається за формулою:

$$u(P) = \sqrt{u^2(\overline{P_e}) + u^2(\delta P_{\text{ем.р}})} \quad (17)$$

де  $u(P)$  – сумарна стандартна невизначеність результату вимірювання тиску, МПа;

$u(\overline{P_e})$  – стандартна невизначеність результату вимірювання тиску еталоном внаслідок розсіювання результатів, МПа;

$u(\delta P_{\text{ем.р}})$  – стандартна невизначеність еталону при заданому тиску, МПа.

За результатами проведених вимірювань тиску розраховуються:

– СКВ результатів вимірювання тиску еталоном визначається за формулою:

$$S(\overline{P_e}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [P_i - \overline{P_e}]^2}{n-1}} \quad (18)$$

– стандартна невизначеність відхилення середнього значення результату вимірювання тиску еталоном, визначається за формулою:

$$u(\overline{P_e}) = \frac{s(\overline{P_e})}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \overline{P_e})^2}{n(n-1)}} \quad (19)$$

Стандартна невизначеність вимірювання тиску еталоном визначається за формулою:

$$u(\delta P_{\text{ем.р}}) = \frac{U(\delta P_{\text{ем.р}})}{2} \quad (20)$$

де  $U(\delta P_{\text{ем.р}})$  – розширена невизначеність еталону (із сертифікату калібрування), МПа.

Розширена невизначеність відтворення тиску в робочому об'ємі стерилізатора розраховується за формулою:

$$U(P) = k \cdot u(P) \quad (21)$$

де  $U(P)$  – розширена невизначеність відтворення тиску, МПа;

$k$  – коефіцієнт охоплення,  $k = 2$  при нормальному законі розподілу і довірчій ймовірності 95%.

На основі отриманих даних формується бюджет невизначеності відтворення тиску в робочому об'ємі стерилізатора (таблиця 2).

Таблиця 2 – Бюджет невизначеності відтворення тиску в робочому об'ємі стерилізатора

Величина $X_i, ^\circ C$	Оцінка $x_i, ^\circ C$	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Розподіл	Коефіцієнт чутливості $c_i$	Внески в сумарну стандартну невизначеність $u(y), ^\circ C$
$\overline{P_e}$	значення	–	–	–	–

$\delta \bar{P}_e$	0	$\sqrt{s(\bar{P}_e)}$	Нормальний	1	$u(\bar{P}_e)$
$\delta P_{em.P}$	0	$\frac{U(\delta P_{em.P})}{2}$	–	1	$u(\delta P_{em.P})$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Рівень довіри	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
$P$	значення	$u(P)$	0,95	$k$	$U(P)$

**Висновки.** Виходячи з вище викладеного матеріалу можна зробити наступні висновки:

– калібрування автоклавів і стерилізаторів парових є досить важливою процедурою для забезпечення точності та стабільності стерилізаційного процесу. Періодичне визначення метрологічних характеристик, зокрема таких параметрів як температура, тиск є критично важливими для дотримання режимів стерилізації. Впровадження системного метрологічного контролю підвищує якість технологічних процесів і довіру до результатів стерилізації;

– для проведення калібрування автоклавів і стерилізаторів парових нагальною є потреба у розробленні відповідної процедури (методики) калібрування. Згідно нормативних документів, що регламентують вимоги до калібрувальних лабораторій, їх акредитації та діяльності, калібрувальні лабораторії можуть розробляти нестандартизовані методики калібрування, з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування).

– розроблені методичні матеріали надають практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення власних нестандартизованих методик калібрування обладнання, зокрема автоклавів і стерилізаторів парових.

#### Інформаційні джерела

1. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT). Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. [Чинний від 23.12.2019]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 23 с.
2. EA-4/02 M: 2022. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration (Виразення невизначеності вимірювання при калібруванні). – European Accreditation, 2022. – 78 с.
3. ILAC G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Керівництво з правил ухвалення рішення та декларацій відповідності). ILAC, 2019. – 22 с.
4. ILAC-P10:07/2020. ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Політика ILAC щодо метрологічної простежуваності результатів вимірювання). ILAC, 2019. 11 с.
5. ILAC P14:09/2020. ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні). ILAC, 2020. 14 с.
6. ЗД-08.00.09. Політика НААУ щодо метрологічної простежуваності вимірювання, що проводять органи з оцінки відповідності відповідно до заявленої сфери акредитації. Редакція 09. Київ : НААУ, 2022. 5 с.
7. ЗД-08.00.29. Політика НААУ щодо участі органів з оцінки відповідності у перевірках професійного рівня та міжлабораторних порівняннях, відмінних від перевірок професійного рівня. Редакція 03. – Київ : НААУ, 2022. 4 с.
8. ІН-08.02.05. Інструкція «Формування сфери акредитації калібрувальної лабораторії». Редакція 04. Київ : НААУ, 2025. 9 с.
9. DKD-R 5-7: Calibration of Climatic Chambers (2004). English Translation (2007). DKD, Брауншвайг, 2004. – 31 с.
10. Calibration Guide EURAMET cg-20 Version 4.0 (02/2015). Calibration of Temperature and / or Humidity Controlled Enclosures. EURAMET e.V. Брауншвайг, 2015. 12 с.
11. Малецька О.Е. Методики калібрування: досвід розроблення та проблеми//Метрологія та прилади. Харків, 2012. № 5, С.35–38.
12. Кепешук Т.В., Кепешук Д.Т. Розроблення методики калібрування трубопоршневих повірочних установок за допомогою компакт-прувера з компаратором. Перспективні технології та прилади. Луцьк, ЛНТУ, 2022. № 21, С.32–37. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-05>.

13. Кепещук Т. В., Пастущин Л. Б., Пташенчук В. В. Типова методика калібрування штангенінструменту. Перспективні технології та прилади. Луцьк, ЛНТУ, 2023. №23, С. 30–37 <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-05>.

14. Кепещук Т. В., Пастущин Л. Б., Методичні аспекти калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин. Методи та прилади контролю якості. ІФНТУНГ 2024. №1 (52). С. 5–14. <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/637>.

15. ДСТУ EN 14180:2015. Стерилізатори медичні. Низькотемпературні парові і формальдегідні стерилізатори. Вимоги та випробовування (EN 14180:2003+A2:2009, IDT). [Чинний від 25.12.2015]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 53 с.

**Кепешчук Т., Malisevych V., Pastushchyn L., Myslytskyi V.**

State enterprise «Ivano–frankivsk scientific and production center for standardization, metrology and certification»

#### METHODICAL ASPECTS OF CALIBRATION OF AUTOCLAVES AND STEAM STERILIZERS

*The purpose of this work is to develop a calibration procedure for autoclaves and steam sterilizers used for moist–heat sterilization of objects and products in medical, food, and other industries, with the aim of destroying all forms of viable microorganisms. The calibration procedure (method) for sterilizers establishes the methods and means of their calibration, which includes, among other things, developing a model equation (mathematical model), forming the uncertainty budget, and assessing the measurement uncertainty. Ensuring the unity and metrological traceability of measurement results is one of the main tasks of calibration laboratories when calibrating measuring instruments and testing equipment.*

*This work presents the methods and means, the procedure for calibrating autoclaves and steam sterilizers, determination of the metrological characteristics of these measuring instruments, development of the mathematical model, formation of the uncertainty budget, and evaluation of measurement uncertainty based on calibration results. The material provides practical recommendations to calibration laboratories regarding the development of non–standardized calibration procedures for equipment, in particular for autoclaves and steam sterilizers.*

**Keywords:** autoclaves and steam sterilizers, calibration laboratory, calibration procedure, measurement uncertainty.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
02.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
11.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 621.88

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-13

<sup>1</sup>Клендій М. Б., <sup>1</sup>Драган А. П., <sup>2</sup>Пилипець М. І.<sup>1</sup>ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»<sup>2</sup>Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

## ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА ІЗ СЕКЦІЙНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

У статті наведено результати теоретичних досліджень моменту інерції гвинтових конвеєрів із секційними робочими органами для трьох режимів роботи: тихохідного, середньошвидкісного та швидкохідного. Розроблено аналітичні залежності для визначення моментів інерції гнучких гвинтових конвеєрів з урахуванням маси транспортованого сипкого матеріалу, кінематичних параметрів і конструктивних особливостей секційного робочого органу. Встановлено вплив механіко-технологічних властивостей сипкого матеріалу на динамічні характеристики гнучких конвеєрів та взаємозв'язок між моментом інерції і режимом їх роботи. Отримані залежності дозволяють уточнити математичні моделі руху матеріалу в конвеєрах, що сприятиме підвищенню точності розрахунків при проєктуванні транспортно-технологічних систем. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні нових конструкцій гнучких шнекових механізмів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.

**Ключові слова:** гвинтовий конвеєр, секційний робочий орган, момент інерції, сипкий матеріал.

**Постановка проблеми.** При роботі більшості гнучких гвинтових конвеєрів зазвичай виникають певні динамічні навантаження, які залежать від маси матеріалу що транспортується, моменту інерції гнучкого секційного конвеєра, кінематичних характеристик робочого органу гнучкого гвинтового конвеєра, а також спричиняються неточністю складання і регулювання ланок кінематичного ланцюга гвинтового конвеєра. На практиці при транспортуванні сипких матеріалів за допомогою гнучких гвинтових конвеєрів часто спостерігаються випадки їх пуску в завантаженому стані, після попередньої зупинки без вивантаження вмісту, наприклад у дозаторах чи навантажувачах зерна, піску, інших вантажів. Процеси, які виникають у цьому випадку, суттєво відрізняються від пуску гнучкого гвинтового конвеєра без сипкого матеріалу. Крім цього навантаження на робочі елементи гнучкого гвинтового конвеєра носять змінний характер, що призводить до зміни та зростання динамічних навантажень на складові частини конвеєра, які в свою чергу можуть привести до виходу його з ладу.

**Аналіз останніх досліджень.** Результати дослідження динамічних і інерційних характеристик робочих органів гвинтових конвеєрів розглянуто в роботах [1-12], в яких авторами наведено двохмасові та трьохмасові динамічні моделі як жорстких так і гнучких гвинтових конвеєрів та машин, складено диференціальні рівняння переміщення сипкого матеріалу, проведено аналіз складових елементів цих рівнянь. Також в цих роботах представлено результати розв'язку диференціальних рівнянь як аналітичними так і чисельними методами. Встановлено, що важливою складовою згаданих вище рівнянь є момент інерції робочого органу гвинтового конвеєра із транспортованим матеріалом. Проведений аналіз публікацій показав, що питанню визначення інерційних характеристик гнучкого гвинтового конвеєра приділено мало уваги, і тому розв'язки диференціальних рівнянь не достатньо точно відображають динамічні характеристики гвинтових транспортерів.

**Мета роботи.** Метою роботи є проведення теоретичних досліджень моментів інерції робочих органів із вантажем тихохідних, середньошвидкісних та швидкохідних гнучких гвинтових конвеєрів.

**Викладення основного матеріалу.** Гвинтові конвеєри за конструктивними особливостями поділяють на три групи: жорсткі із внутрішнім валом, гнучкі суцільні та гнучкі секційні, гвинтові елементи яких з'єднані між собою шарнірами. Крім цього, гвинтові конвеєри за швидкістю обертання робочого органу можна поділити на тихохідні, середньошвидкісні та швидкохідні.

В роботі будемо розглядати конструкції гнучких секційних гвинтових конвеєрів (рис 1), так як транспортування сипких матеріалів криволінійними і комбінованими трасами за

допомогою гнучких шнекових робочих органів, замкнених в еластичні кожухи, забезпечує високу мобільність при виконанні завантажувально-розвантажувальних технологічних процесів і відповідно розширює їх технологічні можливості.

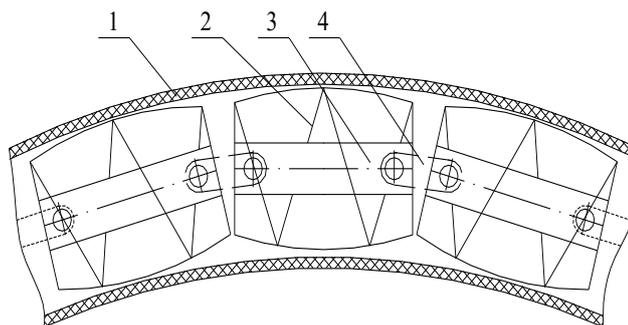


Рисунок 1 - Схема гнучкого секційного гвинтового конвеєра:  
1 – кожух; 2 – шнек; 3 – вал; 4 - шарнір

Момент інерції гвинтового робочого органа з транспортованим сипким матеріалом описуються наступними залежностями:

- для середньошвидкісного та швидкохідного гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{Гро}} = m_{\text{см}} \left( \frac{v_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{см}} \left( \frac{\omega_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{сро}}; \quad (1)$$

- для тихохідних гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{Гро}} = m_{\text{см}} \left( \frac{v_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{сро}}, \quad (2)$$

де  $m_{\text{см}}$  – маса сипкого матеріалу, який транспортується;

$v_{\text{см}}$  – осьова швидкість сипкого матеріалу, який транспортується;

$\omega$  – кутова швидкість обертання гвинтового робочого органа;

$J_{\text{см}}$  – момент інерції сипкого матеріалу, який транспортується;

$\omega_{\text{см}}$  – кутова швидкість обертання сипкого матеріалу, який транспортується;

$J_{\text{сро}}$  – момент інерції гвинтового секційного робочого органа.

Маса сипкого матеріалу, який транспортується:

$$m_{\text{см}} = \frac{\pi D_3 L \varphi \rho}{4}, \quad (3)$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр гвинтового робочого органа;

$L$  – довжина гвинтового робочого органа;

$\varphi$  – коефіцієнт заповнення, міжвиткового простору гвинтового робочого органа;

$\rho$  – густина матеріалу, який транспортується.

Залежно від режиму роботи гвинтового конвеєра при транспортуванні відбувається переміщення матеріалу різними траєкторіями: для тихохідного режиму (до 200 об/хв) – по лінійній траєкторії, для швидкохідного режиму (більше 700 об/хв) – по гвинтовій траєкторії, при середньошвидкісному режимі (від 200 об/хв до 700 об/хв) сипкий матеріал здійснює переміщення по складній траєкторії із частковим пересипанням в зворотному напрямку. Осьову швидкість сипкого матеріалу визначаємо за залежністю:

- для середньошвидкісного режиму роботи конвеєра:

$$v_{\text{см}} = \frac{k_{\text{см}} \omega T}{2\pi}, \quad (4)$$

- для тихохідного і швидкохідного режимів роботи конвеєра:

$$v_{\text{см}} = \frac{\omega T}{2\pi}, \quad (5)$$

де  $k_{\text{см}}$  – коефіцієнт відставання, що враховує пересипання сипкого матеріалу в зворотному напрямку;

$T$  – крок витків гвинтового робочого органа.

При усталеному переміщенні матеріалів годограф вектора швидкості частинки сипкого матеріалу є пряма лінія:

$$\frac{2\pi v_{\text{см}}}{\omega T} + \frac{2v_{\text{км}}}{\omega D_3} = 1, \quad (6)$$

де  $v_{км}$  – колова швидкість матеріалу.

Колову швидкість сипкого матеріалу знаходимо за формулою:

$$v_{км} = \frac{\omega_{см} D_3}{2}. \quad (7)$$

Підставляємо значення залежностей (4) і (7) у рівняння (6), та після перетворень одержимо залежність:

$$\frac{\omega_{см}}{\omega} = 1 - k_{см}. \quad (7)$$

Для швидкохідного режиму залежність (7) матиме вигляд:

$$\frac{\omega_{см}}{\omega} = 1. \quad (8)$$

Момент інерції сипкого матеріалу, який транспортується для швидкохідного та середньошвидкісного режимів визначається із залежності:

$$J_{см} = \frac{m_{см} r_{ісм}^2}{2}, \quad (9)$$

де  $r_{ісм}$  - радіус інерції сипкого матеріалу.

Визначаємо радіус інерції сипкого матеріалу

- для середньошвидкісного режиму аналогічно [3]:

$$r_{ісм} = \frac{D_3 k_{тсм}}{4} (1 + \sqrt{1 - \varphi}), \quad (10)$$

де  $k_{тсм}$  - коефіцієнт зміни траєкторії руху сипкого матеріалу в радіальному напрямку;

- для швидкохідного режиму [2]:

$$r_{ісм} = \frac{D_3}{4} (1 + \sqrt{1 - \varphi}). \quad (11)$$

Підставляючи значення формули (10), (11), (3) у рівняння (9), знаходимо момент інерції сипкого матеріалу:

- для середньошвидкісного режиму:

$$J_{см} = \frac{\pi D_3^4 L \varphi \rho k_{тсм}^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128}. \quad (12)$$

- для швидкохідного режиму:

$$J_{см} = \frac{\pi D_3^4 L \varphi \rho (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128}. \quad (13)$$

Момент інерції гнучкого секційного робочого органу:

$$J_{срo} = \frac{m_{срo} (R_{гп}^2 - r_{гп}^2)}{2}, \quad (14)$$

де  $m_{срo}$  - загальна маса витків робочого органу;

$R_{гп}$  – зовнішній радіус гвинтової поверхні;

$r_{гп}$  - внутрішній радіус гвинтової поверхні.

Визначаємо масу витків:

$$m_{срo} = n \rho_1 h (R_{гп} - r_{гп}) \sqrt{\pi^2 (R_{гп} - r_{гп})^2 + T^2}, \quad (15)$$

де  $\rho_1$  - густина матеріалу витків гвинтової поверхні;

$n$  - загальна кількість витків гвинтової поверхні;

$h$  - товщина поперечного січення витка гвинтової поверхні.

Момент інерції жорсткого робочого органу:

$$J_{жрo} = \frac{m_{срo} (R_{гп}^2 - r_{гп}^2) + m_T (R_I^2 - r_I^2)}{2}, \quad (16)$$

де  $m_T$  - маса труби;

$R_I$  – зовнішній радіус труби;

$r_I$  - внутрішній радіус труби.

Масу труби визначаємо за формулою:

$$m_T = \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2), \quad (17)$$

де  $\rho_2$  - густина матеріалу труби.

Момент інерції гнучкого секційного робочого органа:

$$J_{\text{срo}} = \frac{k_c (m_{\text{срo}} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + m_T (R_1^2 - r_1^2))}{2}, \quad (18)$$

де  $k_c$  - коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості шарнірів.

Підставляючи значення формул (15), (17) у формулу (18), знаходимо момент інерції гнучкого секційного робочого органа:

$$J_{\text{срo}} = \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (19)$$

Підставляючи відповідні складові у формули (1) і (2), знаходимо 3 варіанти для визначення моменту інерції секційного гвинтового робочого органа разом з транспортованим сипким матеріалом:

- для тихохідних гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{срo}} = \pi D_3^2 L \varphi \rho \frac{T^2}{16\pi^2} + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (20)$$

- для швидкохідного гвинтового конвеєра:

$$J_{\text{срo}} = \pi D_3^2 L \varphi \rho \left( \frac{T^2}{16\pi^2} + \frac{D_3^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128} \right) + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (21)$$

- для середньошвидкісного гвинтового конвеєра:

$$J_2 = \pi D_3^2 L \varphi \rho \left( \frac{1}{4} \left( \frac{k_B T}{2\pi} \right)^2 + \frac{D_3^2 k_m^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128} (1 - k_B)^2 \right) + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (22)$$

**Висновки.** Наведено результати теоретичних досліджень з визначення моменту інерції тихохідних, середньошвидкісних та швидкохідних гнучких гвинтових конвеєрів з секційними гвинтовими робочими органами. Також визначено вплив властивостей транспортованого сипкого матеріалу на динамічні характеристики гнучкого гвинтового конвеєра з секційними гвинтовими робочими органами. Встановлено зв'язок між конструктивними особливостями та моментами інерції гнучкого гвинтового конвеєра.

#### Інформаційні джерела

1. Булгаков В. М., Троханяк О. М. Дослідження та вдосконалення запобіжних механізмів шнекових конвеєрів. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Випуск 53. 2023. С. 23-32. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.23-31>.
2. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Гевко І.Б. Тернопіль: ТДТУ, 2008. 307 с.
3. Пастушенко С.І., Клендій М.Б., Троханяк О.М. Дослідження крутного моменту гвинтового конвеєра з лопатевим робочим органом. Науковий вісник таврійського державного агротехнологічного університету. 2021. вип. 11. т. 2. С. 1-11. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-2>.
4. Пилипака С.Ф., Клендій М.Б., Драган А.П. Моделювання та дослідження процесу транспортування сипучого матеріалу перевантажувальним патрубком гвинтового конвеєра.

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2023. вип. 13. т. 1. С. 1-16. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-12>.

5. Bulgakov V., Adamchuk V., Trokhaniak O., Ruzhylo Z. Experimental study of transportation of pool materials by a flexible sectional screw conveyor // Mechanization in Agriculture & Conserving Resources. 2023. Vol. 67, No. 4. P. 113-115. <https://stumejournals.com/journals/am/2023/4/113>.

6. Bulgakov V., Trokhaniak O., Holovach I., Klendii M., Adamchuk V., Ivanovs S. Investigation of the performance of a screw conveyor with a working body, made in the form of a shaft with inclined flat blades. INMATEH - Agricultural engineering. 2022. Vol. 67, No. 2. P. 406-411. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-41>.

7. Bulgakov, V. Trokhaniak, O. Klendii, M. Gadzalo, Ia. Harrow with screw-type operating tools: optimisation of design and process parameters. Eesti Maaulikool Estonian Universiti of Life Sciences. 2022. Agronomy Research 20(4), P. 751–763. <https://doi.org/10.15159/ar.22.055>.

8. Gupta A.K., Nott P.R. Analysis of the flow of granular materials through a screw conveyor // Архів: arXiv. 2021.

9. M. Klendii, I. Lohush, A. Drahan, I. Chvartatskiy, A. Hrabar. Justification and calculation of structural-power parameters of screw loaders. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2022, Vol. 13, No 4, 48-60. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(4\).2022.48-59](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(4).2022.48-59).

10. Serhii Pylypaka, Mykola Klendii. Transportation of a particle of material by the working body of an agricultural machine in the form of a vertical auger limited by a fixed coaxial cylinder. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2022, Vol. 13, No 3, 68-79. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(4\).2022.48-59](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(4).2022.48-59).

11. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q. Research on the principle of a new flexible screw conveyor and its power consumption // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, No. 7. P. 1038.

12. Trokhaniak O.V. Обґрунтування раціональних параметрів шарнірно-з'єднаних робочих органів гнучкого гвинтового конвеєра // Machinery & Energetics. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 79-88. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.79>.

<sup>1</sup>Klendiy M., <sup>1</sup>Drahan A., <sup>2</sup>Pylypets' M.

<sup>1</sup>Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany agrotechnical institute»

<sup>2</sup>Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## ON THE ISSUE OF DETERMINING THE MOMENT OF INERTIA OF A SCREW CONVEYOR WITH A SECTIONAL WORKING BODY

*The article presents the results of theoretical studies of the moment of inertia of screw conveyors with sectional working bodies for three operating modes: low-speed, medium-speed, and high-speed. Analytical dependencies have been developed to determine the moments of inertia of flexible screw conveyors, taking into account the mass of the transported bulk material, kinematic parameters, and structural features of the sectional working body. The influence of the mechanical and technological properties of bulk materials on the dynamic characteristics of flexible conveyors and the relationship between the moment of inertia and the operating mode have been established. The obtained dependencies make it possible to refine mathematical models of material motion in conveyors, which improves calculation accuracy during the design of transport and technological systems. The research results can be used in the development of new designs of flexible screw mechanisms with improved performance characteristics.*

**Keywords:** screw conveyor, sectional working body, moment of inertia, bulk material, dynamic characteristics.

Дата першого надходження  
статті до видання  
12.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
25.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 681.518

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-14

Кубай А. М., Пташенчук В. В., Красовський В. В.

Луцький національний технічний університет

**ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА НА БАЗІ ПРОФІЛОГРАФА-ПРОФІЛОМЕТРА 252**

Проведено розроблення комп'ютеризованої вимірювальної системи для оцінки стану шорсткості поверхні матеріалу на основі профілографа-профілометра моделі 252. Оцифрування профілографа-профілометра за допомогою АЦП USB-4702 забезпечило підвищення точності та можливість автоматизації процесів вимірювання. Застосування програмного забезпечення для оцінки результатів профілометрії поверхонь відповідальних деталей дало можливість проведення якісного автоматизованого аналізу, візуалізації та інтерпретації даних вимірювань. Проведено калібрування вимірювального обладнання для покращення точності вимірювання шорсткості поверхонь виробів. Отримано профілограми дослідних зразків на профілографі-профілометрі 252 в цифровій формі.

**Ключові слова:** профілометрія, вимірювальна система, шорсткість, перетворювач.

**Постановка проблеми.** Вимірювання величини шорсткості поверхонь деталей після механообробки є актуальним та важливим завданням по забезпеченню якості, надійності та довговічності виробів. Дослідження мікронерівностей поверхні є критично важливим у сфері виробництва, оскільки характеристики шорсткості функціональних поверхонь в значній мірі визначають їх зношення в ході тертя а також відповідність галузевим стандартам та технічним вимогам. Тому вдосконалення існуючих методів дослідження мікронерівностей та засобів контролю параметрів шорсткості залишається актуальним завданням сьогодення для забезпечення надійності роботи рухомих та відповідальних механізмів і пристроїв машинобудування, приладобудування та інших галузях.

Проблема дослідження. Мікронерівності поверхонь деталей механізмів та вузлів з рухомими елементами безпосередньо впливають на точність, надійність і довговічність машин і приладів, що робить контроль шорсткості ключовим аспектом в забезпеченні необхідного рівня їх якості [1, 5]. Вимірювання шорсткості проводиться на різних стадіях виробництва для контролю якості обробки та зниження виробничих витрат, пов'язаних із дефектами. Актуальним завданням є розробка та вдосконалення приладів мікропрофілометрії, таких як профілометри та методів дослідження нерівностей поверхонь для більш точного та ефективного контролю параметрів шорсткості, що стимулює подальший розвиток у цій галузі.

Профілометри контактного принципу дії, які застосовують індуктивний щуповий датчик не пристосовані до проведення дистанційних вимірювань. Реєстрація мікронерівностей проводиться магнітоелектричним самопишучим механізмом (рис. 1.2) на паперовому носії інформації (рис. 1) термічним способом [4].

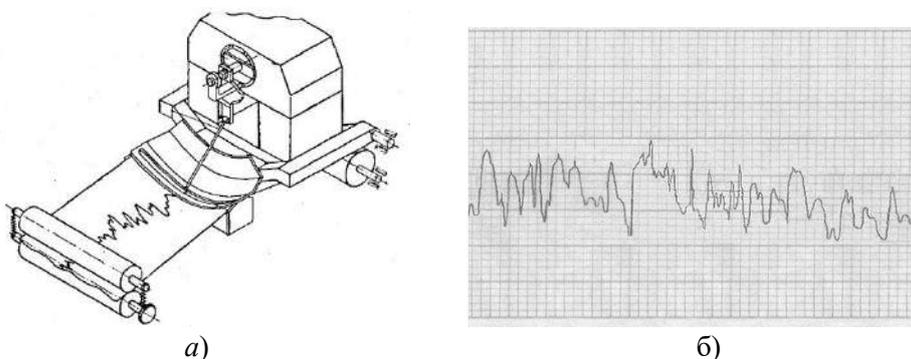


Рисунок 1 – Магнітоелектричний мезанізм запису *a* та профілограма поверхні *б*

Отримання інформації про шорсткість поверхні в аналоговому вигляді та відображення мікронерівності електромеханічним способом є малоефективним через складність процесу обробки інформації. Для забезпечення ефективної обробки вимірювальної інформації стосовно величини мікронерівностей поверхні пропонується обладнати профілограф-профілометр

аналого-цифровим перетворювачем, який буде обробляти сигнал від індуктивного перетворювача та за допомогою програмного забезпечення відображати значення шорсткості поверхні та профілограми нерівностей на екрані персонального комп'ютера, що дасть можливість легко та швидко оцінювати якість оброблюваної поверхні та проводити ефективний контроль її стану.

**Аналіз літературних джерел.** Сучасні матеріали, вироби та технології їх отримання вимагають ефективних способів контролю параметрів якості деталей в ході їхнього виготовлення на основі існуючих або нових методів дослідження мікронерівностей.

Параметри мікронерівностей деталі визначають такі властивості як герметичність виробу, стійкість до корозії, зношення та цілий ряд властивостей поверхні матеріалу, зокрема теплових, гідродинамічних, радіаційних, магнітоелектричних та оптичних [2]. До основних сучасних науково-інженерних розробок способів діагностики стану шорсткості поверхні відносяться атомно-силова мікроскопія, контактна профілометрія та оптична мікроінтерферометрія [3]. На основі наведених способів відбувається покращення методів контролю шорсткості поверхонь деталей та виробів та проводяться пошуки оптимальних методів по досягненню максимально-можливих значень шорсткості для різних типів оброблюваних поверхонь деталей найрізноманітніших матеріалів. Усі існуючі методи вимірювання величини шорсткості та мікронерівностей можна поділити на контактні і безконтактні (рис. 1). Методи контактного моніторингу величини шорсткості поверхні поділяються на шупові та методи зліпок. Безконтактні у свою чергу поділяються на інтерференційні, світлового перетину, тіньової проєкції, растрові та рефлектометричні [3, 4].

**Викладення основного матеріалу.** Профілограф-профілометр моделі 252 призначений для вимірювання в лабораторних умовах шорсткості та хвилястості поверхонь, переріз яких у площині вимірювання представляє пряму лінію. У профілографі-профілометрі використаний індуктивний перетворювач, що дозволяє записувати профіль нерівностей у збільшеному масштабі у вигляді філограми або вимірювати параметри шорсткості у цифровому вигляді за шкалами приладів.

При роботі приладу в режимі профілографа реєструючим пристроєм є прилад з електротермічним записом в прямокутній системі координат. Діапазон вимірювань нерівностей складає від 0,02 до 250 мкм.

Прилад (рис. 2) забезпечений перетворювачем, електронним вимірювальним блоком 7 з рахунковим блоком 8 і записуючим пристроєм 9. Індуктивний перетворювач виконують у вигляді здвоєного сердечника 5 з двома котушками 6. Котушки і дві половини первинної обмотки диференціальної схеми 4 та 10 із частотою 10 кГц. При переміщенні по контрольованій поверхні алмазна голка 3 перетворювача разом з якорем, підвішеному на опорі 2, здійснює коливання. Повороти якоря перерозподіляють індуктивності котушок, змінюючи цим вихідну напругу диференціального трансформатора.

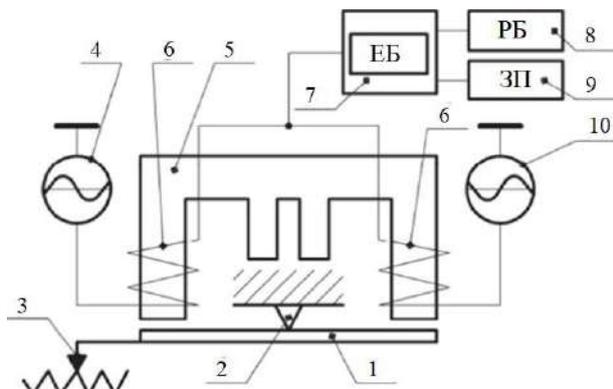


Рисунок 2 – Профілограф-профілометр 252:

- 1 – корпус; 2 – опора; 3 – наконечник; 4,10 – диференціальні схеми; 4 – сердечник;  
6 – котушка; 7 та 8 – електронно-підсумовуючий блок; 9 – записуючий пристрій

Зміни амплітуди напруги характеризують висоту мікронерівності, а зміна частоти (при роботі приладу в режимі профілометра) їх крок. Цифрові значення параметрів визначають за допомогою цифрового відлікового пристрою. При роботі приладу в режимі профілографа зміни напруги подаються на пристрій для запису.

Оцифровка профілографа-профілометра 252 включає процес перетворення аналогового запису профілю шорсткості, отриманої за допомогою старих приладів типу 201, у цифровий формат для подальшої обробки, аналізу та зберігання, що дозволяє автоматизувати розрахунок параметрів ( $R_a$ ,  $R_z$ ) та позбутися ручного аналізу паперових діаграм. Це досягається або скануванням паперової стрічки або підключенням аналого-цифрового перетворювача з обробкою результатів вимірювань в спеціалізованому програмному забезпеченні для отримання точних числових даних та профілограм.

Опираючись на досвід практичної роботи в галузі цифрової та мікропроцесорної електроніки вибираємо бюджетний АЦП фірми Advantech USB-4702 (рис. 3). Цей модуль працює через USB порт, не вимагає додаткового живлення і має прийнятні для нашого випадку характеристики швидкодії та точності.



Рисунок 3 – Аналого-цифровий перетворювач USB-4702

Крім того модуль має 8 вхідних та 8 вихідних ліній дискретного введення, 2 лінії аналогового виведення, 32 розрядний лічильник-таймер. Для нашого випадку необхідно використати лише один канал аналогового виведення. Дослідивши електричну принципову схему профілографа було вирішено сигнал, який відповідає нерівності поверхні, знімати з вихідного каскаду підсилювача перед схемою інтегрування. Для обробки сигналів з АЦП використовуємо програмне забезпечення для роботи з аналоговими вхідними сигналами АЦП USB-4702. Інтерфейс програми представлено на рисунку 4. На екрані одночасно зображено сигнали з усіх 8-ми входів.

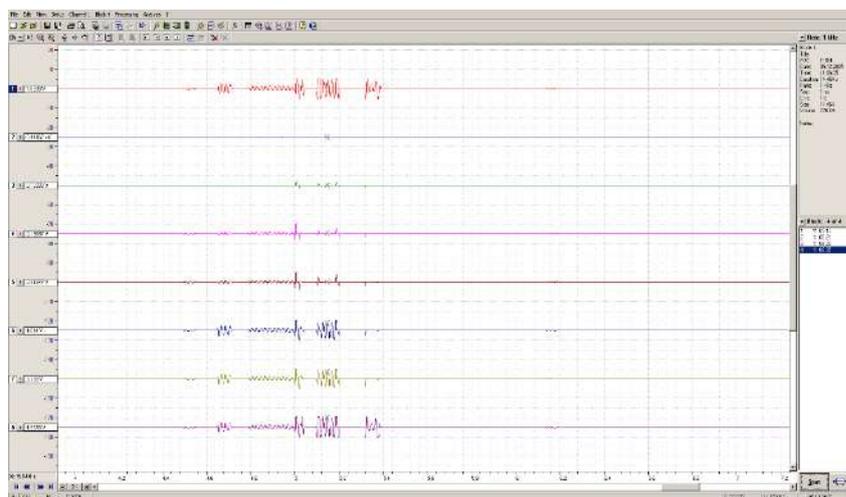


Рисунок 4 – Інтерфейс програми роботи з АЦП USB-4702

Для правильного відтворення профілограми та достовірності передачі інформації від профілометра до комп'ютера необхідно відкалібрувати вхідний підсилювач АЦП. Програма дозволяє зручно це зробити через налаштування. Вікно вхідний підсилювач (Input Amplifier) дозволяє проводити попередній моніторинг вхідного сигналу, вибирати діапазон вимірювання, використовувати програмне калібрування та корекцію вхідного сигналу, встановлювати коректні одиниці вимірювання. Для калібрування використовується кнопка та функція калібрування (calibration) поля помножити (Scale Data) та додати (Offset Data) якої дозволяють вводити

програмні лінійні коефіцієнти перетворення вхідного сигналу. Після проведення калібрування прилад готовий про проведення вимірювання шорсткості поверхонь та зняття профілограм для візуального відображення нерівностей поверхневого шару.

Проведено дослідження шорсткості поверхні підшипникової сталі, а саме торцевої поверхні кільця підшипника кочення (рис. 5).



Рисунок 5 – Дослідження шорсткості кільця підшипника

Профілограма шорсткості поверхні представлена на рисунку 6.



Рисунок 6 – Профілограма кільця підшипника

Оскільки на отриманій профілограмі присутні електромагнітні наведення, як фон мережі у вигляді дрібних зубців вздовж лінії тренду то їх доцільно прибрати. Програма роботи з АЦП дозволяє проводити математичну, статистичну та іншу обробку отриманих експериментальних даних. Після застосування до профілограми математичної високочастотної фільтрації отримаємо покращену профілограму поверхні (рис. 7).

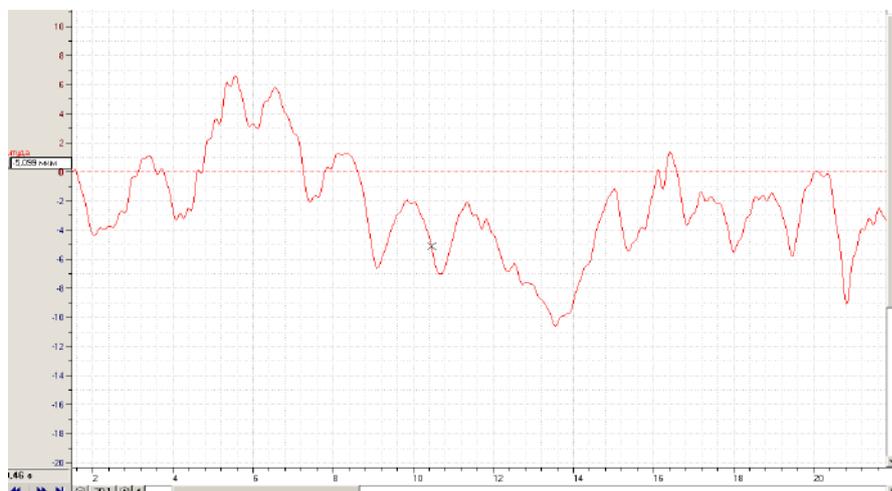


Рисунок 7 – Профілограма поверхні після фільтрації сигналу

Оцифрування профілографа-профілометра 252 забезпечує підвищену точність, автоматизацію процесів вимірювання та об'єктивність їх проведення, дозволяє миттєво аналізувати отримані дані, знижувати витрати на контроль якості, скорочувати час виробництва, працювати з різними досліджуваними матеріалами та інтегруватися в цифрові системи керування, що особливо актуально для сучасного машинобудування та інших галузей, пов'язаних з використанням конструкційних матеріалів.

**Висновки.** Проведено розроблення комп'ютеризованої вимірювальної системи для оцінки стану шорсткості поверхні матеріалу на основі профілографа-профілометра моделі 252. Оцифрування сигналу вимірювальної інформації та застосування програмного забезпечення для оцінки результатів профілометрії поверхонь відповідальних деталей дало можливість проведення якісного автоматизованого аналізу, візуалізації та інтерпретації даних вимірювань та дозволило точно визначити параметри досліджуваних поверхонь та забезпечувати прогнозовані властивості готових виробів, підвищувати їх надійність та довговічність.

### Інформаційні джерела

1. Сьох О. М., Пташенчук В. В. Формування та дослідження мікрогеометрії торців кілець підшипників. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 114-115.

2. Новіков Ф. В. Оптимальні рішення в технологіях механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 360 с

3. Аналіз методів контролю шорсткості поверхні деталей. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3db263bb-abe8-4d21-b3fc-3bb4178afa87/content> (дата звернення: 10.09.2025).

4. Засоби контролю шорсткості поверхні. URL: [https://obrobka.pp.ua/646-zasobi-vimryuvannya-shorstkost-poverhn.html#google\\_vignette](https://obrobka.pp.ua/646-zasobi-vimryuvannya-shorstkost-poverhn.html#google_vignette) (дата звернення: 12.09.2025).

5. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликотпідшипників методом переривчастого шліфування : монографія / Пташенчук В. В. та інші. Луцьк: Вежа-Друк. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation\\_for\\_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation_for_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC) (дата звернення: 14.09.2025).

**Kubay A., Ptashenchuk V., Krasovsky V.**

Lutsk National Technical University

### MEASUREMENT SYSTEM BASED ON PROFILOGRAPH-PROFILOMETER 252

*A computerized measuring system has been developed to assess the state of material surface roughness based on the profilograph-profilometer model 252. Digitization of the profilograph-profilometer with the help of the USB-4702 ADC provided increased accuracy and the possibility of automating measurement processes. The use of software for evaluating the results of profilometry of surfaces of critical parts made it possible to conduct high-quality automated analysis, visualization and interpretation of measurement data. Calibration of measuring equipment was carried out to improve the accuracy of measuring the roughness of product surfaces. Profilograms of test samples on the profilograph-profilometer 252 were obtained in digital form.*

**Keywords:** profilometry, measuring system, roughness, converter.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
08.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
14.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 004.422

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-15

Маркіна Л. М., Чернобай М. В., Сацик В. О., Смолянкін О. О.

Луцький національний технічний університет

## КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ І КОНТРОЛЮ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ

У статті проведено аналіз та дослідження проблеми низької обізнаності студентів, особливо першокурсників у яких напочатку навчання виникають складнощі з адаптацією, самоорганізацією, самоконтролем та алгоритмами розрахунку семестрової оцінки в умовах кредитно-модульної системи у відповідності до болонської форми навчання. На сьогоднішній день існуючі програмні рішення, зокрема інституційні системи управління навчанням (LMS) та комерційні мобільні додатки мають чимало недоліків з точки зору студент центрованого підходу. Проведено обґрунтування необхідності створення спеціалізованого застосунку, який би був орієнтований на студента початківця і враховував специфіку української системи вищої освіти. Запропоновано програмне рішення у вигляді прототипу на мові програмування Python для автоматизації процесу обчислення підсумкової оцінки. Програмний застосунок також може бути впроваджений в освітній процес вищих навчальних закладів як інструмент для наочного навчального матеріалу для ознайомлення з особливостями кредитно-модульної системи оцінювання у закладах вищої освіти.

**Ключові слова:** система оцінювання, академічна успішність, ECTS, автоматизація, програмне забезпечення, Python, оцінювання.

**Постановка проблеми.** Інтеграція України в європейський освітній простір є одним із ключових наслідків Болонського процесу, яка призвела до фундаментальних змін у системі вищої освіти в нашій країні [1]. До однієї із найважливіших трансформацій відноситься впровадження Європейської кредитно-модульної та накопичувальної системи (ECTS). Дані зміни регулюються відповідними наказами Міністерства освіти і науки України. Ця система передбачає навчальне навантаження в обсязі 60 кредитів ECTS на навчальний рік і спрямована на стандартизацію, підвищення прозорості освітніх програм та сприянню академічної мобільності [3, 4]. Поряд з тим, болонська система навчання на практиці передбачає складні, багаторівневі механізми оцінювання знань, які є викликом для безпосередніх учасників освітнього процесу [1].

У відповідності до впровадженої системи підсумкова оцінка за дисципліну перестала бути результатом лише фінального іспиту, а перетворилась на інтегральний показник, який враховує безліч компонентів:

- поточну успішність на практичних, семінарських заняттях та лабораторних робіт;
- модульні контрольні роботи та самостійну роботу.

Важливим елементом є те, що кожен із цих елементів має свій унікальний ваговий коефіцієнт, який визначається науково-педагогічним працівником в робочій програмі конкретної навчальної дисципліни [1]. Попри раціональність такої структури в контексті комплексного оцінювання, вона формує істотні когнітивні та психологічні труднощі для студентів, особливо тих, що починають навчання й адаптуються до нового академічного середовища [2]. Аналіз наукових джерел та проведені опитування серед студентів засвідчує, що під час адаптації першокурсники стикаються з рядом проблем, серед яких: нечітка мотиваційна спрямованість, слабкі навички організації самостійної роботи та недостатній рівень самоконтролю [8].

Відсутність розуміння того, як саме кожен вид навчальної діяльності впливає на кінцевий результат призводить до низки негативних наслідків: від нездатності стратегічно планувати свій час та розподіляти зусилля до виникнення стресових ситуацій та загальної демотивації [2]. У результаті відсутності простого й зручного інструменту для самоконтроля студент поступово втрачає відчуття керованості власною навчальною діяльністю. Це негативно впливає на становлення академічної самостійності та внутрішньої мотивації, оскільки відчуття автономії є однією з базових психологічних потреб, що забезпечують ефективний процес навчання.

Отже, важливість проведеного дослідження визначається необхідністю розроблення простого й доступного програмного середовища, яке забезпечить прозорість, зрозумілість і контрольованість процесу розрахунку оцінювання для студента. Такий інструмент має виконувати не лише функцію обчислення, а й підтримувати розвиток академічної самостійності, забезпечуючи студенту можливість ефективно контролювати власний прогрес у навчанні.

**Аналіз існуючих програмних рішень та наукових підходів.** Проведений аналіз існуючих рішень дозволив встановити, питанням моніторингу і підтримки академічної успішності актуальними, як для фахівців з освітніх технологій так і науково-педагогічних працівників. Сучасні програмні продукти, що існують на сьогоднішній день пропонують такі функції, які поділяють на дві групи: системи управління навчанням, які використовуються закладами освіти та окремі комерційні додатки для індивідуального користування студентами.

Зокрема, про інституційні системи управління навчанням (LMS). Вищі навчальні заклади для адміністрування навчального процесу в переважній більшості впроваджують такі платформи, як Moodle, Canvas, Blackboard та багато інших [7, 8]. Головним елементом цих систем з точки зору оцінювання є електронний журнал (Gradebook). Цей інструмент надає викладачам потужний функціонал для формування схем оцінювання. Системи дозволяють групувати завдання у категорії (Weighted Categories в Moodle, Assignment Groups в Canvas), де кожній категорії (наприклад, "лабораторні роботи", "практичні роботи", "модульні контролі", "іспит") присвоюється певний відсоток від підсумкової оцінки [10]. Це повністю відповідає вимогам кредитно-модульної системи.

Однак аналіз існуючих систем з позиції студента демонструє наявність суттєвого розриву між адміністративним впровадженням та реальними освітніми потребами користувача. Запровадження принципів ECTS [10] в українських університетах переважно орієнтується на підвищенні ефективності внутрішнього адміністрування, тоді як питання, що пов'язані з підтримкою індивідуальної освітньої траєкторії студента – розуміння структури оцінювання, планування навчальної діяльності та контроль власного прогресу в навчальному процесі опинились поза увагою [5, 6]. Для прикладу, студентський інтерфейс, зокрема розділ «User report» у Moodle, фактично відображає лише статичний звіт: відображаються бали, виставлені викладачем, і автоматично згенерована підсумкова оцінка, але при цьому не пропонується студенту активний інструмент взаємодії. Особливо відчутною є відсутність механізму моделювання певних сценаріїв, таких як "what-if" (в перекладі "що, якщо?"), який дозволив би першокурснику самостійно з'ясувати, наприклад: «Яку мінімальну кількість балів потрібно отримати на іспиті, щоб досягти оцінки "добре"?»

У підсумку, незважаючи на ефективність LMS як інструменту для викладача та адміністрації вищого навчального закладу, для студента дана система залишається так званою «чорною скринькою», що лише фіксує результат, але не сприяє і не мотивує його до досягнення кращих результатів.

Щодо комерційних мобільних додатків та онлайн-версій призначених для допомоги студентам в організації навчального процесу на ринку існує значна кількість: My Study Life, iStudiez Pro, PowerPlanner та інші. До їхніх переваг можна віднести зручний та орієнтований на користувача студента інтерфейс. Проте існують і недоліки, які стосуються їх функціоналу в контексті потреб української системи освіти. Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна стверджувати, що ключовою характеристикою цих рішень є їх обмеженість, яка проявляється у спрощенні розрахунків, комерційних обмеженнях та відсутності адаптації до стандартів України.

Таким чином, маємо дефіцит спеціалізованих рішень. Потреба студентів існує, але її реалізація економічно неприваблива для приватних компаній. Це формує нішу для некомерційного інструменту, орієнтованого на освітню ефективність.

**Виклад основного матеріалу.** Прозорість і зрозумілість критеріїв оцінювання є одним із фундаментальних чинників ефективного навчання. Дослідження у сфері педагогічної психології підтверджують, що чітке розуміння студентом механізмів формування підсумкової оцінки безпосередньо впливає на розвиток внутрішньої мотивації та академічної самостійності. Коли здобувач освіти бачить логічний і передбачуваний зв'язок між власними діями та кінцевим результатом, він переходить від пасивного виконання вимог до активного управління власною освітньою траєкторією.

Це відповідає теорії самодетермінації, яка пояснює, що людям важливо відчувати, що вони можуть самі щось контролювати і що в них це виходить. Коли ці потреби задоволені, з'являється більше мотивації й стає легше вчитися. Тому інструмент, який дозволяє студенту самому стежити за своїми балами та прогнозувати підсумок, допомагає краще розуміти навчальний процес і відчувати впевненість у своїх можливостях [6].

Проведений порівняльний аналіз наочно демонструє необхідність у розробці нового програмного рішення, яке дозволить зробити оцінювання прозорим і зрозумілим для студентів, забезпечить зручний розрахунок підсумкових балів та водночас сприятиме підвищенню їх мотивації й академічної самостійності (таблиця 1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз існуючих програмних рішень

№	Критерій	Програмні рішення		
		LMS (Moodle, Canvas)	Комерційні додатки	Запропонована система
1.	Цільовий користувач	Викладач, адміністратор	Студент (глобальний ринок)	Студент (український контекст)
2.	Гнучкість вагового коефіцієнта	Висока (для викладача)	Низька / Середня	Висока (для студента)
3.	Функція прогнозування	Відсутня для студента	Обмежена / Платна	Ключова функція
4.	Вартість	Інституційна ліцензія	Freemium / Платна	Безкоштовний
5.	Адаптація до українських стандартів	Часткова	Низька	Повна

Отримані результати та проведені дослідження підтверджують необхідність створення спеціалізованого автоматизованого програмного інструменту, який забезпечить студентам прозорий і зрозумілий механізм обчислення підсумкової семестрової оцінки відповідно до вимог української кредитно-модульної системи (ECTS). Для реалізації такого програмного інструменту спочатку було виконано низку взаємопов'язаних завдань.

По-перше, проведено вивчення труднощів, з якими стикаються студенти, насамперед першокурсники, у розумінні багаторівневої системи оцінювання, яка передбачає формування підсумкової кількості балів на основі зваженої суми окремих видів навчальної діяльності.

По-другу, проведений порівняльний аналіз (таб.1) існуючих програмних рішень та систем управління навчанням, що дозволило визначити їхні обмеження. Зокрема, LMS орієнтовані переважно на адміністративні функції та не надають студенту інструментів для прогнозування результатів, а комерційні застосунки базуються на узагальнених моделях оцінювання і не враховують специфіку української системи оцінювання та зважених коефіцієнтів.

Як наслідок, опираючись на отримані дані аналізу та проведених досліджень було прийнято рішення, щодо розробки алгоритму обчислення підсумкової оцінки на основі формули зваженої суми та реалізовано програмний прототип мовою Python [9]. Розроблене програмне рішення виконує такі функції:

- підтримує перевірку коректності введених даних;
- автоматичне перетворення результату у 100-бальну національну та ECTS-шкалу [10];
- забезпечує точне відтворення структури оцінювання згідно з робочою програмою навчальної дисципліни.

Метою нового розробленого програмного рішення є створення інструменту, який виконує не лише функцію обчислення підсумкових балів, а й виступає повноцінним педагогічним засобом. Такий інструмент має підвищувати прозорість оцінювання, підтримувати розвиток самоконтролю та академічної мотивації студентів, а також надавати можливість моделювати й прогнозувати власні навчальні результати.

Написаний нами застосунок, який реалізовано на мові програмування Python призначений, в першу чергу, для автоматизації розрахунку проміжних та підсумкових балів студентів першокурсників і не тільки, а також формує рекомендацій щодо покращення результату. Під час реалізації програмного коду були використана бібліотека ttkbootstrap, що дозволила створити сучасний графічний інтерфейс користувача.

Загальна структура програми містить три основні функціональні блоки:

1. Головний інтерфейс користувача (рис. 1):

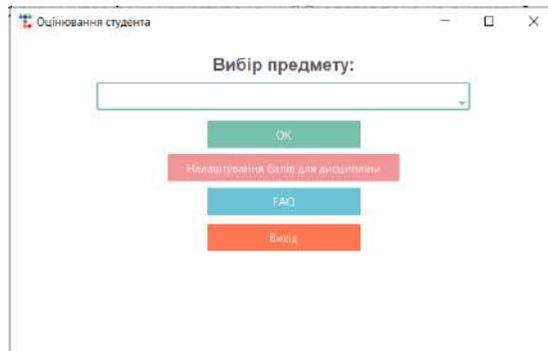


Рисунок 1 – Загальний інтерфейс програми

- вибір дисципліни (рис. 2).

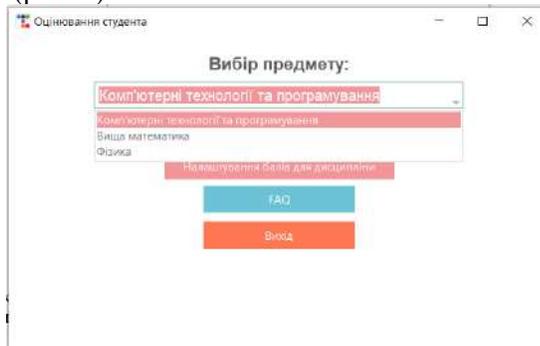


Рисунок 2 – Вікно вибору дисциплін

- кнопки запуску оцінювання (рис. 3), перегляду довідки (рис. 4) та завершення роботи.

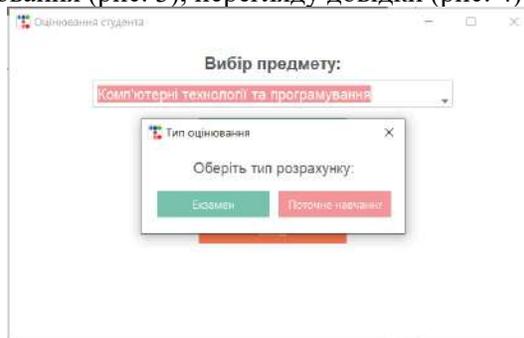


Рисунок 3 – Вибір оцінювання

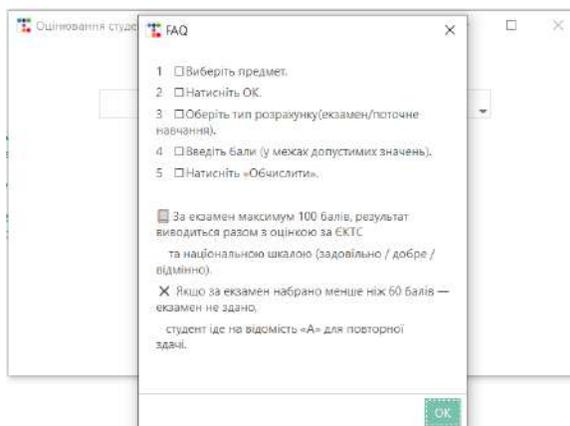


Рисунок 4 – Інструкція для користувача

- після вибору предмета програма переходить до діалогу вибору типу оцінювання.
- 2. Діалог вибору режиму оцінювання. Пропонується два режими:
  - екзамен (рис. 5);
  - поточне навчання (модулі, практичні, лабораторні роботи), рисунок 6.

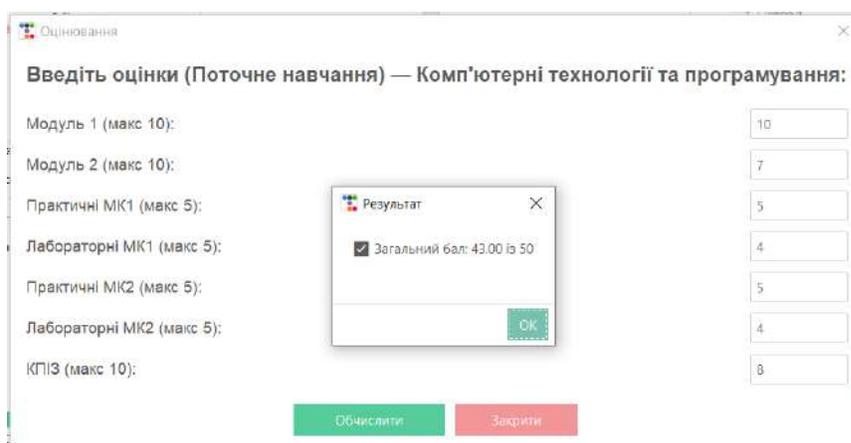


Рисунок 5 – Розрахунок поточної успішності студента

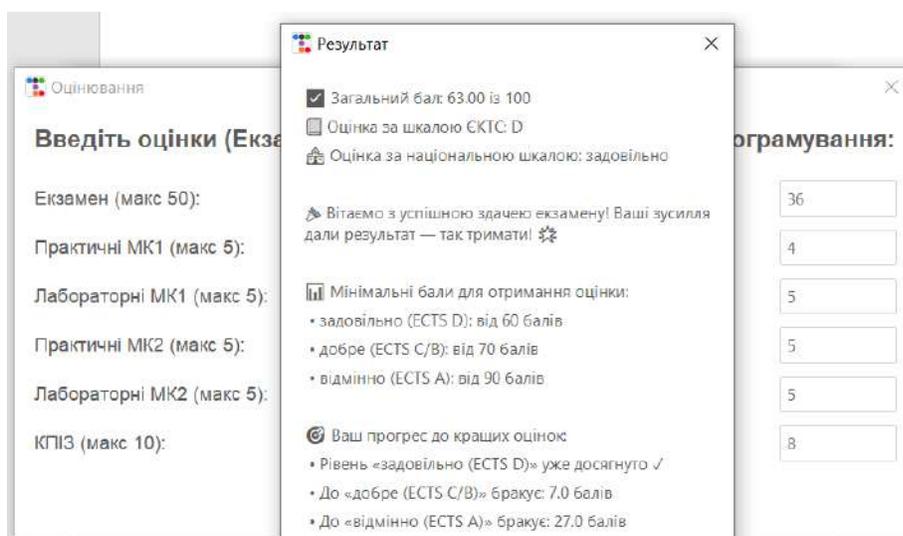


Рисунок 6 – Розрахунок екзаменаційної оцінки

3. Модуль введення балів та обчислень. У відповідності до вибраного режиму оцінювання та введених балів у відповідних полях здійснюється перевірка коректності введених даних, обчислення суми балів та визначення оцінки за встановленою шкалою ECTS. У відповідності до

системи оцінювання у вищих навчальних закладах України, лістинг 1.

Лістинг 1 – Фрагмент коду введення балів та обчислень

---

```
def calculate_total():
    total = 0.0
    values = {}

    # Перевірка коректності даних
    for name, entry in entries.items():
        raw = entry.get().strip().replace(", ", ".")
        if raw == "":
            messagebox.show_warning(f"Поле «{name}» не заповнене.")
            entry.focus_set()
            return
        try:
            val = float(raw)
        except ValueError:
            messagebox.show_error(f"Поле «{name}» повинно містити число.")
            entry.focus_set()
            return
        max_val = max_scores.get(name, 0)
        if not (0 <= val <= max_val):
            messagebox.show_error(
                f"Поле «{name}» має бути в межах 0–{max_val}."
            )
            entry.focus_set()
            return
        values[name] = val
        total += val

    # Визначення максимальної оцінки
    if mode == "Екзамен":
        max_total = 100
    else:
        max_total = sum(max_scores.get(label, 0) for label in labels)

    # Перевірка перевищення введення даних
    if total > max_total:
        messagebox.show_error(
            f"Сума {total:.2f} перевищує максимум {max_total}."
        )
        return

    # Результат
    msg = f"Загальний бал: {total:.2f} із {max_total}\n"

    # Обчислення та результат
    if mode == "Екзамен":
        if total >= 90:
            ects = "А"
        elif total >= 80:
            ects = "В"
```

```
elif total >= 70:
    ects = "C"
elif total >= 60:
    ects = "D"
elif total >= 50:
    ects = "E"
elif total >= 30:
    ects = "FX"
else:
    ects = "F"

# Національна шкала
if ects == "A":
    national = "відмінно"
elif ects in ("B", "C"):
    national = "добре"
elif ects in ("D", "E"):
    national = "задовільно"
else:
    national = "незадовільно"
msg += f"Оцінка за ЄКТС: {ects}\n"
msg += f"Національна оцінка: {national}\n"

# Перевірка результатів
if total < 60:
    msg += (
        "\nЕкзамен НЕ складено.\n"
        "Студент направляється на відомість «А».\n"
    )
else:
    msg += "\nЕкзамен успішно складено! "
Messagebox.ok(msg, title="Результат")
```

---

кінець лістингу 1

**Висновки.** Розроблений програмний застосунок забезпечує не лише автоматизоване обчислення підсумкової семестрової оцінки, але й надає можливість студенту першокурснику прогнозувати результати успішності шляхом зміни окремих компонентів. Така функціональність підсилює здатність до самоконтроля в навчальному процесі, а також сприяє підвищенню мотивації студента та формуванню його академічної незалежності. Окрім цього, дане програмне забезпечення може бути впроваджене в освітній процес вищих навчальних закладів як інструмент для формування індивідуального самоконтролю студентів, як наочного навчального матеріалу для ознайомлення з особливостями кредитно-модульної системи оцінювання у закладах вищої освіти.

#### Інформаційні джерела

1. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII // *Відомості Верховної Ради України*. 2014. № 37–38. Ст. 2004.
2. Міністерство освіти і науки України. Про запровадження у вищих навчальних закладах України Європейської кредитно-трансферної системи : наказ від 16 жовт. 2009 р. № 943 // *Офіційний вісник України*. 2009. № 84. Ст. 2857.
3. Ryan R. M., Deci E. L. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being // *American Psychologist*. 2000. Vol. 55, No. 1. P. 68–78.

4. Про впровадження кредитно-модульної системи організації навчального процесу : Наказ МОН України від 30.12.2005 № 774. URL: [https:// zakon.rada.gov.ua/laws/show /z0178-06](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0178-06) (дата звернення: 15.10.2025).
5. Довідник користувача ECTS. Люксембург : Бюро офіційних публікацій Європейського Союзу, 2015. 72 с.
6. Рашкевич Ю. М. Болонський процес та нова парадигма вищої освіти. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 168 с.
7. Moodle Gradebook Setup // *Moodle Teaching Resources*. URL: <https://teaching-resources.delta.ncsu.edu/moodle-gradebook/> (дата звернення: 18.10.2025).
8. How do I weight the final course grade based on assignment groups? // *Canvas Community*. URL: <https://community.canvaslms.com/t5/Instructor-Guide/How-do-I-weight-the-final-course-grade-based-on-assignment/ta-p/1134> (дата звернення: 18.10.2025).
9. Lutz M. Learning Python. 5th ed. O'Reilly Media, 2013. 1648 p.
10. Про затвердження Положення про організацію освітнього процесу в Луцькому національному технічному університеті. URL: [http://vstup.ntu.edu.ua/publicnainfo/polozh\\_pro\\_orhanizatsiyu\\_osvitnoho\\_protsesu.pdf](http://vstup.ntu.edu.ua/publicnainfo/polozh_pro_orhanizatsiyu_osvitnoho_protsesu.pdf) (дата звернення: 12.10.2025).

Markina L., Chornobai M., Satsyk V.  
Lutsk National Technical University

#### COMPUTERIZED SYSTEM FOR AUTOMATING CALCULATIONS AND MONITORING STUDENTS' ACADEMIC PERFORMANCE

*The article analyzes and examines the problem of low awareness among students, especially first-year students who initially experience difficulties with adaptation, self-organization, self-control, and algorithms for calculating semester grades in the credit-modular system in accordance with the Bologna process. Today, existing software solutions, in particular institutional learning management systems (LMS) and commercial mobile applications, have many shortcomings from the point of view of a student-centered approach. The necessity of creating a specialized application that would be oriented towards beginner students and take into account the specifics of the Ukrainian higher education system has been substantiated. A software solution in the form of a prototype in the Python programming language has been proposed to automate the process of calculating the final grade. The software application can also be implemented in the educational process of higher education institutions as a tool for visual teaching material to familiarize students with the features of the credit-modular assessment system in higher education institutions.*

**Keywords:** *assessment system, academic performance, ECTS, automation, software, Python, assessment.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
12.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
14.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 621.3.049.76

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-16

Марчук В. І., Денисюк В. Ю., Пилипець М. І.

Луцький національний технічний університет

## ПРОЄКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУПОЛОПОДІБНОГО ТИПУ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті представлено результати дослідження пружних елементів куполоподібного типу, що застосовуються у мікроелектромеханічних системах (МЕМС) як складові сенсорів, мікроприводів, комутаційних пристроїв та мікроманіпуляторів. Розроблено аналітико-чисельну методику проєктування та аналізу актюаторів з використанням програмних модулів «Актюатор 1.0» і «Актюатор 2.0», результати яких верифіковано у середовищі ANSYS 14.5 та експериментально. Проведено параметричне моделювання впливу основних геометричних характеристик (радіуса кривизни, товщини, радіуса опорної поверхні та діаметра центрального отвору) на робочі характеристики актюаторів. Встановлено критичні значення параметрів, за яких відбувається втрата дискретності робочої характеристики, що дозволило побудувати поверхню рівноважних станів та визначити області стабільного функціонування. Запропоновано алгоритм оптимізації конструкції із застосуванням еволюційного підходу, який забезпечує мінімізацію площі актюатора за умови заданих критичних параметрів. Отримані результати демонструють високу достовірність чисельних розрахунків, підтверджену експериментальними даними, та ефективність використання розроблених програмних засобів для синтезу і оптимізації пружних елементів МЕМС.

**Ключові слова:** мікроелектромеханічні системи, куполоподібний актюатор, пружний елемент, чисельне моделювання, ANSYS, оптимізація, еволюційний алгоритм.

**Постановка проблеми.** Сучасні мікроелектромеханічні системи (МЕМС) потребують високоточних, стабільних і надійних пружних елементів, які забезпечують перетворення енергії, рух або комутацію з мікромасштабною точністю. Одним із найбільш ефективних конструктивних рішень є куполоподібні актюатори, робота яких базується на явищі проклацування. Однак, незважаючи на широке застосування таких елементів, процеси їх деформування, стійкості та переходу між рівноважними станами мають складний нелінійний характер і суттєво залежать від геометричних параметрів та матеріальних властивостей.

Відсутність узагальненої методики, яка б поєднувала аналітичне, чисельне та експериментальне моделювання, ускладнює достовірне прогнозування робочих характеристик і оптимізацію конструкцій куполоподібних актюаторів. Це призводить до необхідності багатоетапного проєктування, підвищення матеріалоємності та ризику втрати дискретності робочої характеристики.

Тому актуальним є створення комплексної методології аналізу й оптимізації пружних елементів куполоподібного типу, що забезпечить підвищення достовірності чисельного моделювання, скорочення часу проєктування та підвищення ефективності мікромеханічних пристроїв.

**Проблема дослідження.** Проблема дослідження полягає у забезпеченні достовірного моделювання, аналізу та оптимізації пружних елементів куполоподібного типу, що використовуються у мікроелектромеханічних системах. Нелінійна поведінка таких елементів під дією зовнішніх навантажень, наявність множини рівноважних станів та чутливість до геометричних і матеріальних параметрів ускладнюють процес прогнозування їхніх характеристик.

Існуючі підходи здебільшого орієнтовані на спрощені аналітичні моделі або на трудомістке чисельне моделювання без урахування взаємозв'язку між геометрією, матеріалом і умовами навантаження. Це обмежує можливості точного визначення критичних параметрів, які впливають на стабільність, чутливість та ефективність роботи актюаторів.

Таким чином, наукова проблема полягає у розробленні комплексної методики, що поєднує аналітичне, чисельне та експериментальне моделювання для підвищення точності прогнозування та оптимізації параметрів куполоподібних пружних елементів, з метою покращення їхніх робочих характеристик і надійності в складі мікроелектромеханічних пристроїв.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у галузі проектування мікроелектромеханічних систем (МЕМС) свідчать про зростаючий інтерес до створення високочутливих і стабільних пружних елементів куполоподібного типу. Такі елементи використовуються як основа для актуаторів, сенсорів тиску, мікроперемикачів, систем термостатування та позиціонування, що вимагає забезпечення їх високої надійності, відтворюваності характеристик і ефективності роботи в умовах обмежених габаритів [1, 2].

Відомо, що куполоподібні пружні елементи мають нелінійні механічні властивості, зокрема явище проклацування (snap-through), яке супроводжується різкою зміною геометрії при досягненні критичного навантаження. Цей ефект активно використовується у двостійких та термоактивованих МЕМС-структурах. Дослідження показують, що геометричні параметри таких елементів (радіус кривизни, товщина, центральний отвір, профіль гофрів) суттєво впливають на форму робочої характеристики, критичне навантаження та стійкість системи [3].

У численних роботах застосовуються методи теорії тонких оболонок та методи скінченних елементів (FEM) для аналізу пружних і термопружних станів куполоподібних мембран. Зокрема, використання програмних комплексів ANSYS, COMSOL Multiphysics та ABAQUS дозволяє досліджувати вплив нелінійної геометрії, контактних взаємодій і комбінованих навантажень на поведінку тонкостінних структур. Однак для багатьох типів пружних елементів досі бракує універсальних методик, які б забезпечували високу точність прогнозування при мінімальних обчислювальних витратах [4].

У роботах [5, 6] підкреслюється важливість верифікації чисельних моделей через порівняння з експериментальними результатами та аналітичними рішеннями. Встановлено, що похибки чисельних методів можуть бути зумовлені не лише дискретизацією сітки, а й вибором типу елементів, формою апроксимаційних функцій і неврахуванням температурних або залишкових напружень. У зв'язку з цим в останні роки активно розвиваються підходи, що інтегрують чисельне моделювання з експериментальною перевіркою та подальшою параметричною оптимізацією конструкції.

Актуальним напрямом також є розроблення інформаційно-аналітичних систем для автоматизованого синтезу пружних елементів, що поєднують обчислювальні методи, бази параметрів і засоби оптимізації. Такі системи дозволяють скорочувати час розрахунків і підвищувати точність вибору геометричних характеристик. У цьому контексті важливу роль відіграють розробки авторів у вигляді програмних модулів «Актуатор 1.0» (для аналізу) та «Актуатор 2.0» (для синтезу і багатопараметричної оптимізації), які реалізують алгоритми чисельного моделювання, перевірені порівнянням з результатами ANSYS та експериментальними даними [4, 7].

Попри наявні досягнення, залишається відкритою низка питань, пов'язаних із урахуванням технологічних похибок виготовлення, впливом анізотропії матеріалу, багатокритеріальною оптимізацією параметрів і дослідженням довговічності пружних елементів при багаторазовому циклі проклацування. Недостатньо вивченими залишаються також задачі масштабування результатів чисельного аналізу до мікрорівня, де значний вплив мають поверхневі сили, температурні поля і залишкові напруження у тонких плівках [8].

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що незважаючи на суттєвий науковий прогрес у сфері моделювання та оптимізації куполоподібних пружних елементів, існує потреба у розробленні комплексного підходу, який забезпечує достовірність чисельного аналізу, параметричну гнучкість, можливість багатокритеріальної оптимізації та інтеграцію з експериментальними дослідженнями.

**Метою роботи** є розроблення та обґрунтування методики проектування, чисельного моделювання і експериментального дослідження пружних елементів куполоподібного типу для мікроелектромеханічних пристроїв з метою підвищення достовірності прогнозування їхніх механічних характеристик, оптимізації геометричних параметрів та покращення функціональних властивостей.

**Викладення основного матеріалу.** Пружні елементи куполоподібного типу широко застосовуються у мікроелектромеханічних системах (МЕМС) як складові сенсорів, мікроприводів, комутаційних пристроїв та мікроманіпуляторів. Їх функціонування базується на ефекті пружної нестійкості (проклацування), що забезпечує значне переміщення при невеликій зміні навантаження. Для забезпечення стабільності та повторюваності цього ефекту необхідне точне визначення геометричних параметрів і механічних характеристик матеріалу куполу.

У роботі було досліджено два типи куполоподібних актуаторів, які широко

застосовуються в електромеханічних пристроях завдяки простоті конструкції та технологічності виготовлення: актюатор без отвору (рис. 1, а) та актюатор з центральним отвором (рис. 1, б). Наявність отвору забезпечує можливість надійного закріплення елемента в конструкції пристрою.

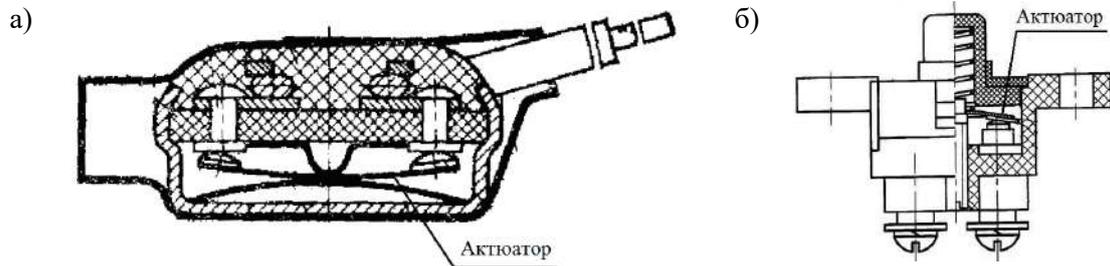


Рисунок 1 – Електротехнічні пристрої та з куполоподібними актюатором

Для задачі про деформацію пологого напівсферического осесиметричного біметалевого актюатора термореле було проведено порівняння результатів, отриманих у програмі «Актюатор 1.0» з результатами, отриманими в кінцево-елементному комплексі ANSYS 14.5.

Розміри куполоподібного актюатора показані на рисунку 2: радіус кривизни меридіана  $R_m=22,2$  мм, радіус опорної поверхні  $r=2,5$  мм, товщина  $h=0,06$  мм, товщина активного шару  $h_1=0,0205$  мм, товщина пасивного шару  $h_2 = 0,0195$  мм. Купол закріплений в центрі за всіма ступенями вільності. Вузол 1 розташований на зовнішньому контурі, що відповідає точці установки електричного контакту (рис. 3).

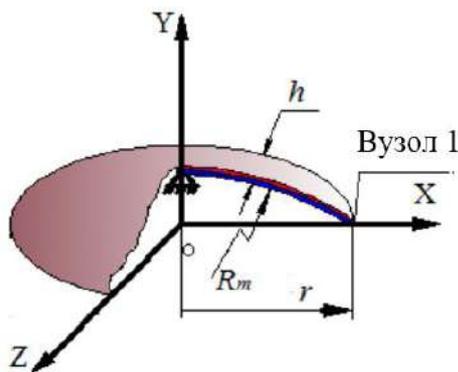


Рисунок 2 – Геометричні параметри куполоподібного актюатора

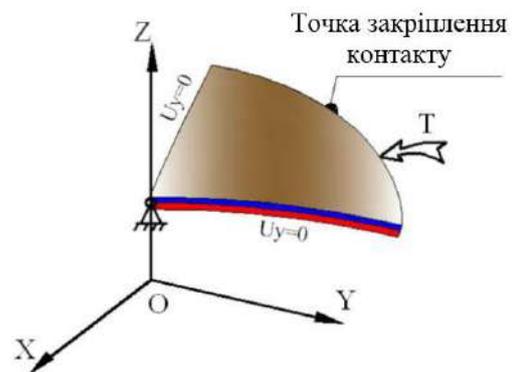


Рисунок 3 – Граничні умови

Навантаження – рівномірно розподілена температура. Кінцево-елементна модель актюатора з урахуванням симетрії приведена на рисунку 4. Для вирішення задачі в кінцево-елементному комплексі ANSYS використовувалися елементи PLANE42. Аналіз проводився за різними кінцево-елементними сітками. Подрібнення сітки виконувалося до отримання результатів з необхідною точністю. На рисунку 5 показані вихідна і деформована форма актюатора. Було реалізовано проклацування актюатора: його меридіанна кривизна на периферійній частині змінила знак.

На рисунку 6 наведені робочі характеристики актюатора, отримані у програмі «Актюатор 1.0» і за допомогою кінцево-елементного комплексу ANSYS 14.5.

Верхня критична температура  $T_1^{кр}=120$  °С, нижня критична температура  $T_2^{кр}=32$  °С. Результати показують гарний збіг, відмінність в критичних температурах становить менше 5%, що дає підстави стверджувати про достовірність отриманих результатів. При подрібненні сітки спостерігалася збіжність рішення. При використанні різних кінцевих елементів отримані схожі результати. Можна також порівняти результати роботи програми «Актюатор 1.0» з результатами експерименту. В експерименті використовувалися сталеві актюатори у вигляді пологих осесиметричних оболонок (рис. 7). Актюатори закріплювалися на опорі посудини для випробувань за допомогою фланця (рис. 8), додаткового хомута і 8 болтів (рис. 9). Актюатори були навантажені рівномірним тиском  $P$ .

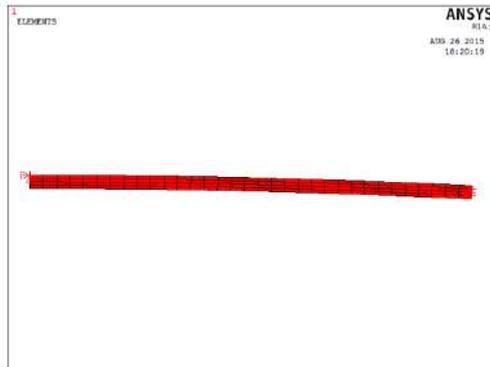


Рисунок 4 – Кінцево-елементна модель актюатора без отвору



Рисунок 5 – Вихідна і деформована форми актюатора

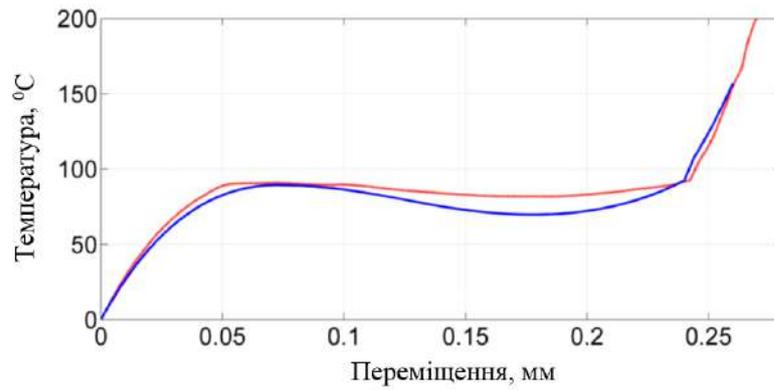


Рисунок 6 – Робоча характеристика актюатора без отвору (червона лінія – ANSYS 14.5, синя лінія – «Актюатор 1.0»)

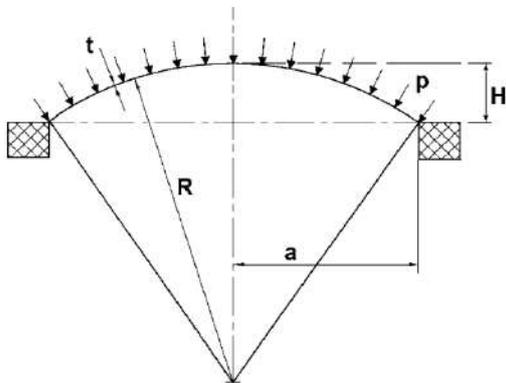


Рисунок 7 – Геометричні параметри сферичного актюатора

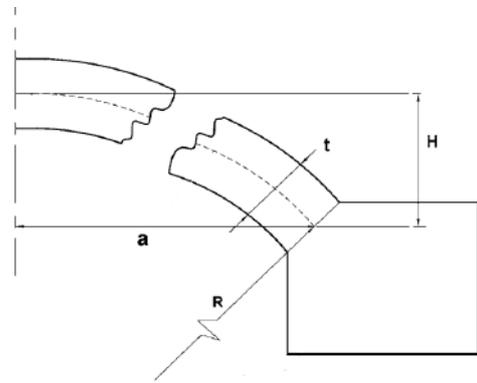


Рисунок 8 – Фланець сферичної оболонки

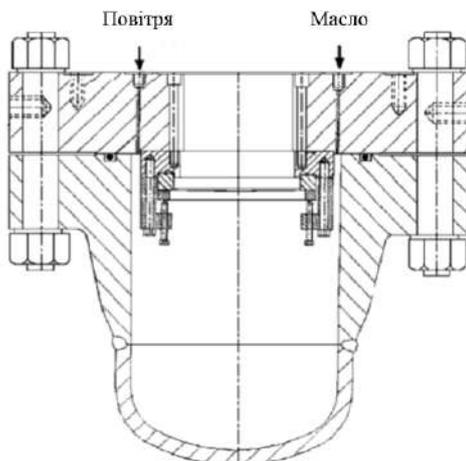
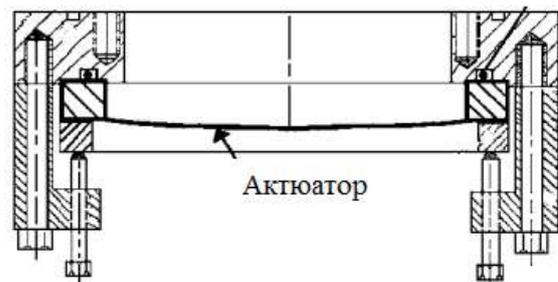


Рисунок 9 – Посудина для випробувань із закріпленим в ній сферичним актюатором



Матеріал актюатора володіє наступними механічними характеристиками: модуль пружності – 207 ГПа, коефіцієнт Пуассона – 0,28. Геометричні параметри тестових зразків (табл. 1) було виміряно за допомогою тривісного координатного вимірювального столу (рис. 10). Середовищем створення тиску було масло. Навантаження проводилося за допомогою насоса. В ході експерименту актюатори покладавали при покроковому (від критичного тиску) створенні квазістатичного тиску. Актюатор після проклаування показаний на рисунку 11.

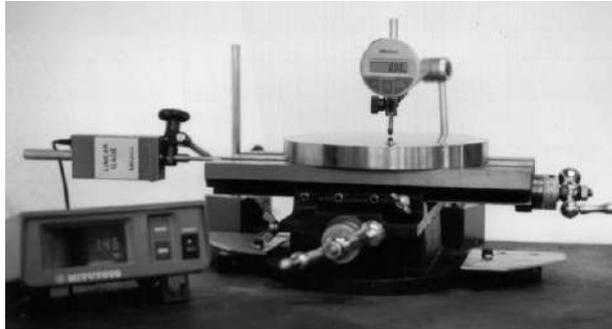


Рисунок 10 – Стіл для вимірювання геометричних параметрів

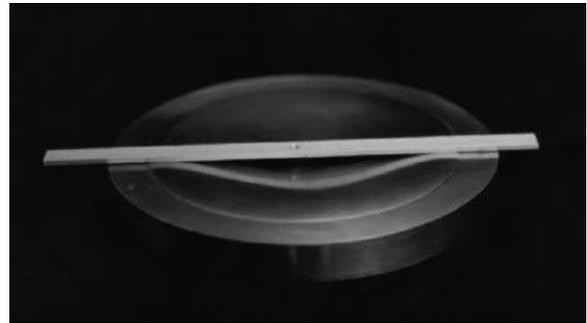


Рисунок 11 – Фотографія сферичного актюатора після проклаування

Таблиця 1 – Параметри зразків

Номер зразка	$2a$ , мм	$H$ , мм	$t$ , мм	$R$ , мм
1	166,12	1,90	1,0	1816,5
2	166,13	2,15	1,02	1605,7
3	166,10	3,93	1,03	878,6

Порівняння значення критичних тисків, отриманих в результаті експерименту, з результатами роботи програми «Актюатор 1.0» наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння результатів експерименту з результатами, отриманими у програмі «Актюатор 1.0»

Номер актюатора	$P_{кр}^{експеримент}$ , МПа	$P_{кр}^{експеримент} / P_{кр}^{Актюатор 1.0}$
1	0,0458	1,04
2	0,0523	0,92
3	0,211	1,01

Близькість значень критичних тисків дозволяє стверджувати про достовірність результатів, отриманих за програмою.

Проведено дослідження впливу основних геометричних параметрів актюатора – радіуса кривизни меридіана, радіуса опорної поверхні, товщини та діаметра центрального отвору – на його робочу характеристику. Метою аналізу є вивчення параметричного простору для подальшого розв'язання задачі синтезу оптимальної конструкції.

Аналіз впливу радіуса кривизни меридіана здійснювався за фіксованих значень радіуса опорної поверхні та товщини актюатора ( $r = 2,5$  мм,  $h = 0,04$  мм). Радіус кривизни меридіана актюатора змінювався від 20 мм до 40 мм.

На рисунку 12 представлено сімейство робочих характеристик у просторі температура – переміщення – радіус кривизни. Встановлено, що існує критичне значення радіуса кривизни меридіана, за якого робоча характеристика втрачає дискретний характер. Поверхня рівноважних станів у тривимірному просторі має форму, подібну до збірки Уїтні [4].

На рисунку 13 показана залежність критичних температур перемикавання актюатора від радіуса кривизни його меридіана. При збільшенні радіуса кривизни меридіана актюатора перша критична температура знижується, друга критична температура збільшується.

На рисунку 14 показана залежність переміщення точки закріплення контакту від радіуса кривизни його меридіана. Корисне переміщення точки закріплення контакту зменшується при збільшенні радіуса кривизни меридіана актюатора.

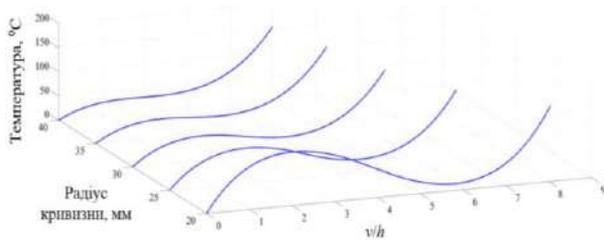


Рисунок 12 – Вплив радіусу кривизни меридіана актюатора на робочу характеристику

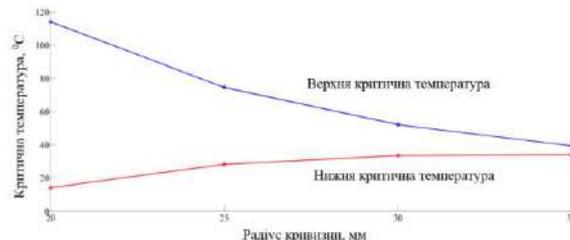


Рисунок 13 – Вплив радіусу кривизни меридіана актюатора критичні на температури

Таким чином проекція поверхні рівноважних станів в підпросторі керуючих параметрів може мати особливі точки: мале зміна параметрів може викликати біфуркацію або катастрофу – різкий перехід системи в новий стан при критичних значеннях параметрів.

Аналіз впливу радіусу опорної поверхні актюатора проводився при незмінних радіусі кривизни меридіана і товщині актюатора ( $R_m=30$  мм,  $h=0,04$  мм). Радіус опорної поверхні актюатора змінювався від 2 мм до 4 мм.

Сімейство робочих характеристик в просторі температура – переміщення – радіус опорної поверхні показано на рисунку 15.

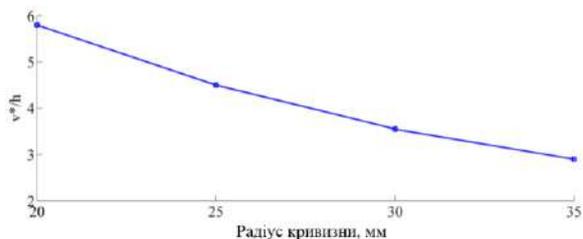


Рисунок 14 – Вплив радіусу кривизни меридіана актюатора на корисне переміщення

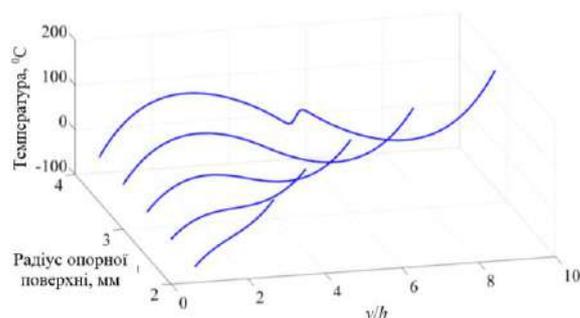


Рисунок 15 – Вплив радіусу опорної поверхні актюатора на робочу характеристику

Існує критичне значення радіусу опорної поверхні актюатора, при якому робоча характеристика перестає бути дискретною. Критичне навантаження збільшується при збільшенні радіусу опорної поверхні, тому що оболонка стає більш жорсткою.

Аналіз впливу товщини актюатора проводився при незмінних радіусі кривизни меридіана і радіусі опорної поверхні актюатора ( $R_m=30$  мм,  $r=2,5$  мм). Товщина актюатора змінювалася від 0,02 мм до 0,06 мм.

Сімейство робочих характеристик в просторі температура – переміщення – товщина показано на рисунку 16. Існує критичне значення товщини актюатора, при якому робоча характеристика перестає бути дискретною.

Основні параметри осесиметричного диска з отвором показані на рисунку 17.

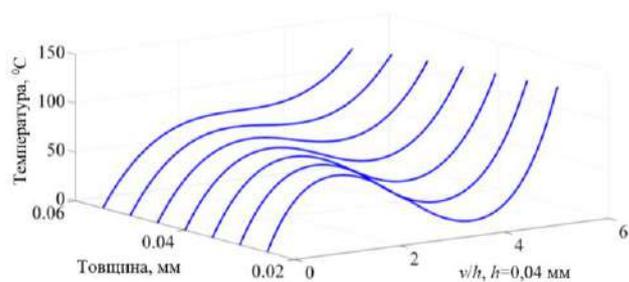


Рисунок 16 – Вплив радіусу опорної поверхні актюатора на робочу характеристику

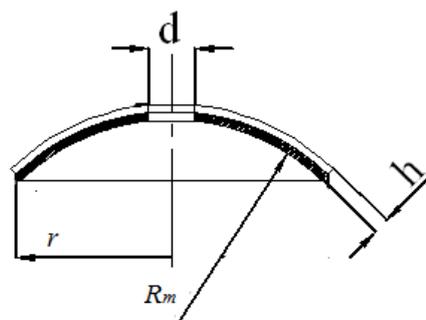


Рисунок 17 – Геометричні параметри актюатора з центральним отвором

Граничні умови відповідають закріпленню диска по центральному отвору і умовам симетрії по меридіанних лініях, які обмежують чверть диска (рис. 18).

Аналіз впливу діаметра отвору актюатора проводився за незмінних радіусі кривизни меридіана, товщині актюатора і радіусі опорної поверхні ( $R_m=25$  мм,  $h=0,04$  мм,  $r=2,5$  мм). Діаметр отвору актюатора змінювався від 0 мм до 2 мм.

Сімейство робочих характеристик в просторі температура – переміщення – діаметр центрального отвору показано на рисунку 19. Існує критичне значення діаметра отвору актюатора, при якому робоча характеристика перестає бути дискретною.

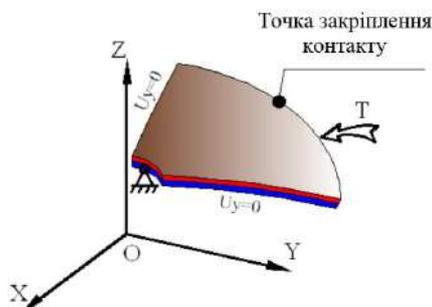


Рисунок 18 – Граничні умови

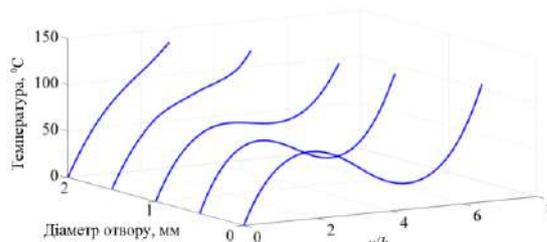


Рисунок 19 – Вплив діаметра отвору актюатора на робочу характеристику

На рисунку 20 показана залежність критичних температур перемикавання актюатора від діаметра отвору. У міру наближення розміру діаметра отвору до критичної величини, діапазон температур перемикавання різко знижується (близько 10 °С). При збільшенні діаметра отвору друга критична температура збільшується.

На рисунку 11 показана залежність переміщення точки закріплення контакту від діаметра отвору. Корисне переміщення точки закріплення контакту зменшується при збільшенні діаметра отвору.

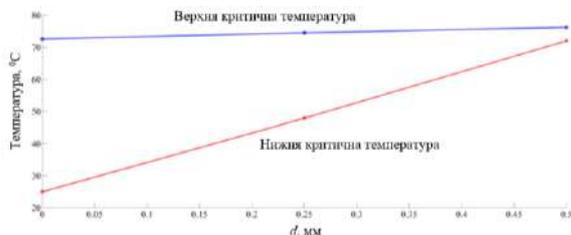


Рисунок 20 – Вплив діаметра отвору актюатора на критичні температури

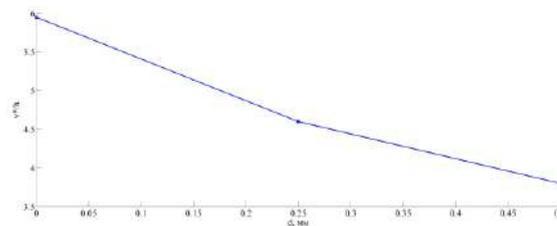


Рисунок 21 – Вплив діаметра отвору актюатора на корисне переміщення

При малих розмірах отвору ( $d/2r \leq 0,1$ ) він не здійснює істотного впливу на пружну характеристику.

Розглянуто задачу визначення радіуса кривизни меридіана, при якому спрацьовування актюатора термодатчика для контролю температури відбувається при заданій температурі. Задача була вирішена у програмі «Актюатор 2.0» і за допомогою еволюційного алгоритму.

Синтез проводився при наступних незмінних параметрах: радіус опорної поверхні актюатора  $r=2,5$  мм, товщина  $h=0,04$  мм. Граничні умови для термобіметалевого актюатора у формі тонкої сферичної оболонки на зовнішньому контурі відповідають умовам шарнірного опираювання.

За допомогою програми «Актюатор 2.0» було отримано, що для реалізації спрацьовування при температурі 60 °С радіус кривизни меридіана повинен дорівнювати 32,4 мм (рис. 22).

Результати, отримані із застосуванням еволюційного алгоритму показали хороший збіг з результатами заданої програми. При однаковій точності результатів трудовитрати при використанні програми «Актюатором 2.0» виявляються на порядок менше.

Розв'язана задача мінімізації площі актюатора, що реалізує проклацування на задану величину при заданому значенні критичного тиску (були задані обмеження на величину переміщення характерної точки після проклацування і критичний тиск:  $v^* \in [140,150]$  мкм,  $P^* \in$

[85,95] Па):

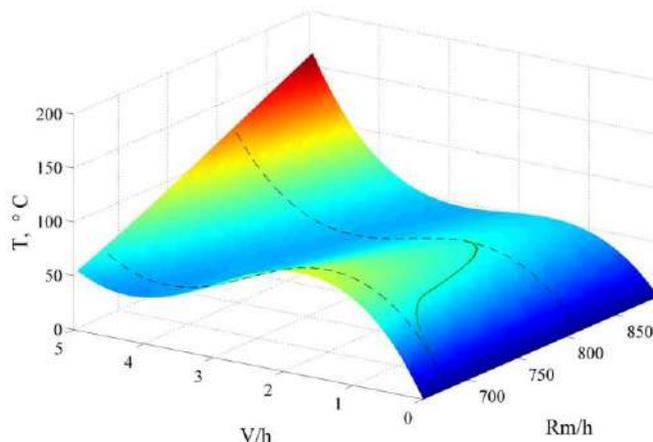


Рисунок 22 – Синтез куполоподібного актюатора

Площа актюатора  $\rightarrow \min$

$$\begin{aligned} (140 - v^*) \leq 0, & \quad (v^* - 150) \leq 0, \\ (85 - p^*) \leq 0, & \quad (p^* - 95) \leq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Параметрами актюатора були радіус кривизни меридіана  $R_m$ , радіус отвору  $r_1$ . Товщина актюатора лінійно змінюється від  $h_1$  до  $h_2$  між радіусами  $r_1$  і  $r_2$ , від  $h_2$  до  $h_3$  між радіусами  $r_2$  і  $r_3$  і від  $h_3$  до  $h_4$  між радіусами  $r_3$  і зовнішнім радіусом (рис. 23).

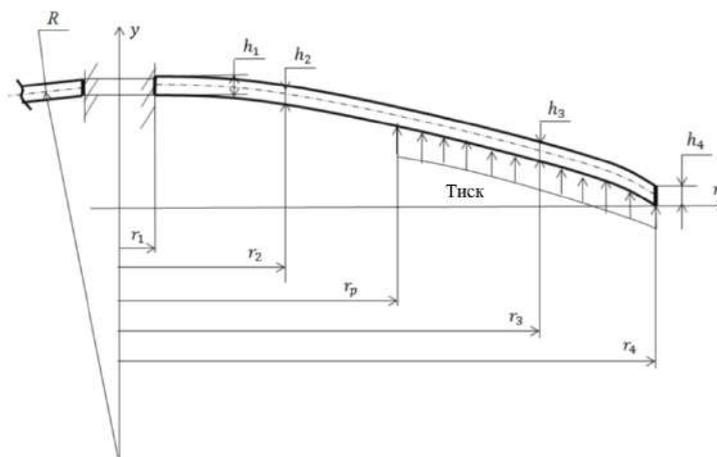


Рисунок 23 – Параметри актюатора

Актюатор виготовлений з кремнію (фізико-механічні характеристики  $E_1=1,35 \cdot 10^5$  МПа,  $\nu = 0,3$ ). Актюатор жорстко закріплений по контуру отвору. Актюатор навантажений рівномірним тиском по кільцю, обмеженому радіусом  $r_p$  і зовнішнім радіусом.

Межі зміни параметрів актюатора:  $R_m \in [32, 52]$  мм;  $r_1 \in [200, 400]$  мкм;  $r_2 \in [200, 2800]$  мкм;  $r_3 \in [200, 2800]$  мкм;  $r_p \in [200, 2800]$  мкм;  $h_1 \in [10, 40]$  мкм;  $h_2 \in [10, 40]$  мкм;  $h_3 \in [10, 40]$  мкм;  $h_4 \in [10, 40]$  мкм.

В ANSYS 14.5 задача вирішувалася рf осесиметричною моделлю з використанням елементів PLANE183 з включенням опції великих переміщень методом дугових зарубок.

В результаті рішення задачі синтезу були визначені раціональні параметри актюатора, робоча характеристика якого задовольняє заданим умовам. Актюатор має площу  $6,35 \text{ мм}^2$ . Час роботи програми – 3,1 години.

Раціональні параметри актюатора:  $R_m=41,4$  мм;  $r_1=230,2$  мкм;  $r_2=297,8$  мкм;  $r_3= 623,6$  мкм;  $r_p= 996,4$  мкм;  $h_1= 20,3$  мкм;  $h_2= 11,7$  мкм;  $h_3= 10,9$  мкм;  $h_4= 11$  мкм.

В результаті виконання задачі розходження раціональних параметрів актюатора для реалізації проклацування на задану величину при заданому тиску було розглянуто 80 реалізацій (80 різних комбінацій геометричних параметрів). Рішення вважалося придатним, якщо воно близьке до оптимального за обома цільовими функціями, що визначалися проектувальником.

Необхідно, щоб переміщення центральної точки мікроактюатора було не менше заданого, для забезпечення необхідного контактного зусилля, тому було введено додаткове обмеження  $v > v^*$ .

Проекція чотиривимірного простору  $(R_m, h, P, v)$  на критеріальну площину  $P$ - $v$  дозволяє вибрати необхідне рішення (рис. 24).

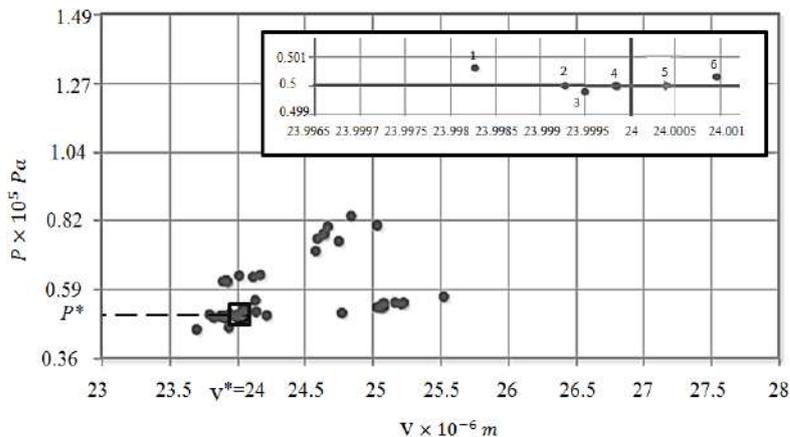


Рисунок 24 – Критеріальна площина  $P$ - $v$

На рисунку 24 – шість точок, близьких до оптимального рішення, показані на виносці. Значення радіуса кривизни і товщини актюатора в цих точках наведені в таблиці 3. Початкова і деформована форма актюатора показана на рисунку 25.

Таблиця 3 – Значення параметрів в оптимальних точках

Номер оптимальної точки	Товщина, мм	Радіус кривизни, мм
1	2,273	3,140
2	2,242	3,127
3	2,244	3,119
4	2,229	3,098
5	2,228	3,097
6	2,223	3,093

Запропонована методика проектування актюаторів дискретної дії за заданими функціональними параметрами показала свою ефективність і може бути рекомендована для створення широкого кола виконавчих, запобіжних і комутаційних мікроелектромеханічних пристроїв.

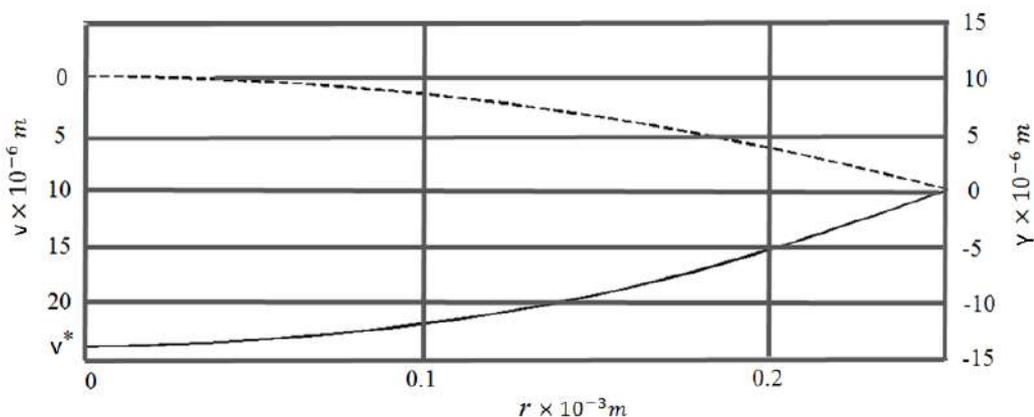


Рисунок 25 – Початкова (пунктирна лінія) і деформована після проклацування (суцільна лінія) форми актюатора для раціональної геометрії

**Висновки.** Розроблено аналітико-чисельну методику аналізу та синтезу пружних елементів куполоподібного типу, що поєднує чисельне моделювання (ANSYS), параметричну оптимізацію та експериментальну перевірку результатів. Створені програмні модулі «Актюатор 1.0» і «Актюатор 2.0» забезпечують достовірність розрахунків (відхилення не

перевищує 5% порівняно з результатами ANSYS і експериментом) та дозволяють значно скоротити час проектування.

Визначено вплив основних геометричних параметрів актюатора (радіуса кривизни, товщини, радіуса опорної поверхні, діаметра отвору) на критичні температури, тиски та характер проклацування. Виявлено критичні значення параметрів, за яких відбувається втрата дискретності робочої характеристики. Використання еволюційного алгоритму оптимізації дало змогу визначити раціональні параметри актюатора, що забезпечують проклацування при заданому тиску або температурі, з мінімальною площею конструкції.

Запропонована методика може бути використана для створення високочутливих, стабільних та енергоефективних пружних елементів у складі мікроелектромеханічних сенсорів, виконавчих і комутаційних пристроїв.

#### Інформаційні джерела

1. Філяшкін М. К. Мікроелектромеханічні системи: навч. посібн. Київ: НАУ, 2019. 276 с.
2. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. Київ: НАУ, 2017. 528 с.
3. Лобур М., Мельник М. Основи мікросистемних пристроїв: навч. посіб. URL: <http://cad.lp.edu.ua/project/b3.pdf> (дата звернення 06.11.2025).
4. Теслюк В. М., Кривий Р. З., Мельник М. Р. Автоматизація проектування МЕМС з використанням системи COMSOL: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2016. 216 с.
5. Боровий М. О., Куницький Ю. А., Каленик О. О., Овсієнко І. В., Цареградська Т. Л. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої: навч. посіб. Київ: Інтерсервіс, 2015. 350 с.
6. Денисюк В. Ю. Методика розрахунку і проектування актюаторів дискретної дії. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2024. Вип. 25. С. 53-58. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-08>
7. Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. URL: <https://surl.li/vkiiii> (дата звернення 21.09.2025).
8. Діденко Ю. В., Татарчук Д. Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 113 с.

**Marchuk V., Denisyuk V., Pylypets M.**  
.Lutsk National Technical University

#### DESIGN AND RESEARCH OF DOME-SHAPED TYPE ELASTIC ELEMENTS FOR MICROELECTROMECHANICAL DEVICES

*This paper presents a comprehensive study of dome-shaped elastic elements widely used in microelectromechanical systems (MEMS) as components of sensors, microactuators, switching units, and micromanipulators. An analytical and numerical design methodology has been developed using the software modules Actuator 1.0 and Actuator 2.0, with the results verified by simulations in ANSYS 14.5 and confirmed experimentally. Parametric modeling was performed to analyze the influence of the main geometric parameters (curvature radius, thickness, support radius, and central hole diameter) on the operational characteristics of the actuators. Critical parameter values were identified where the discrete behavior of the characteristic is lost, allowing the construction of the equilibrium surface and determination of the stability regions. An optimization algorithm based on an evolutionary approach was proposed to minimize the actuator area under given critical parameters. The obtained results demonstrate high reliability of the numerical calculations, with deviations below 5% compared to experimental data, and confirm the efficiency of the developed software tools for the synthesis and optimization of MEMS elastic elements.*

**Keywords:** *microelectromechanical systems, dome-shaped actuator, elastic element, numerical modeling, ANSYS, optimization, evolutionary algorithm.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
12.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-17

**Мережа А. С., Пташенчук В. В.**

Луцький національний технічний університет

## ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ

*У статті представлено систему моніторингу температури різання матеріалів в ході їх оброблення. Наведено структурну та функціональну схему виміральної системи. Для визначення температури матеріалів, особливо в ході їх технологічної обробки (різання, гартування) застосовано термоелектричний датчик, який забезпечує необхідний верхній поріг вимірювань до 1500°C та має високу точність. Висока чутливість та мала інерційність сприяють застосуванню датчиків цього типу для вимірювання температури різання металів. Проведено розробку виміральної системи дослідження температури при шліфуванні побудованої на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та його цифровізацію. Використання мікроконтролера, ізотермічного блоку та оптоелектронного блоку дають змогу проводити обробку інформації, дистанційної передачі та підвищення її точності. Наведений алгоритм керування теплонапруженістю процесу абразивного оброблення металів та їх сплавів як правило включає в себе аналіз існуючих теплових навантажень в схемі технологічної обробки та застосування технічних засобів контролю температури та впливу на неї для забезпечення стабільності обробки та уникнення теплових дефектів.*

**Ключові слова:** вимірвальна система, температура, шліфування, управління, алгоритм, контроль.

**Постановка проблеми.** Значення температурних вимірювань у сучасній техніці є надзвичайно значимим, що проявляється у великій кількості таких вимірювань в різних галузях, таких як машинобудування, приладобудування, верстатобудування, космічна галузь та інші. Використання металевих конструкційних матеріалів високої точності в усіх наведених галузях забезпечується фінішними операціями обробки, які супроводжуються високими контактними температурами при їх обробці та впливають на експлуатаційні та надійнісні параметри виробу та технічної системи в цілому. Температурні вимірювання являються основою для вивчення енергетичних та міцнісних характеристик технічних систем, оптимізації ефективності їх роботи та надійності в ході експлуатації. Експлуатація складних технічних систем, які мають рухомі елементи та піддаються впливу різного роду динамічних навантажень залежить від якості поверхневого шару матеріалу на який значний вплив має температура в ході його оброблення. Температура є невід'ємним ключовим фактором, який має безпосередній вплив на властивості матеріалу, може їх змінювати як в кращу так і в гіршу сторону. Надто висока температура може призвести до припиків, тріщин та викришування поверхневого шару, низька призводить до зниження режимних параметрів та зменшення ефективності процесу маханобробки та виробництва в цілому. Високі некритичні значення температури є корисними, дозволяють покращувати твердість за рахунок гартування матеріалу а при необхідності досягати необхідної пластичності за рахунок відпуску металевих залізвуглецевих сплавів.

Вплив температури на поверхневий шар при термоциклічному характері її зміни має позитивний ефект на якість та експлуатаційні характеристики виробів [1]. Однак, забезпечення необхідного рівня якості поверхневого шару матеріалу при переривчастому шліфуванні можливе при цілеспрямованому та контрольованому впливі температури на оброблювану поверхню [2] та залишається актуальним питанням у зв'язку з термоциклічним характером зміни температури та складністю її визначення, пов'язаною з низькою чутливістю датчиків температури та досить швидкою зміною теплонапруженості процесу переривчастого шліфування.

**Аналіз досліджень і публікацій за темою роботи.** Дослідження температури процесу переривчастого шліфування включає в себе дослідження факторів, які мають вплив на теплонапруженість процесу обробки, таких як швидкість різання, подача матеріалу, тип абразиву, конструкція різального інструменту та властивості матеріалу заготовки. Важливе місце при дослідженні температури переривчастого шліфування має характер зміни температури під

впливом конструктивних параметрів різального інструменту та її вплив на властивості оброблюваного матеріалу. Температура в зоні контакту переривчастого абразивного інструменту та досліджуваної заготовки являється визначальним параметром, який характеризує якість новоутвореної поверхні, зношення інструменту та ефективності процесу загалом [3]. Для аналізу температури різання переривчастим інструментом повинні застосовуватися сучасні моделі та методи її вимірювання, враховуючи нестабільний та динамічний характер процесу термоциклічного оброблення переривчастими різальними інструментами.

Переривчасте шліфування є сучасним та прогресивним методом обробки металевих конструкційних матеріалів, особливо важкооброблюваних [4, 5]. На даний момент теоретично обґрунтовано ефективність застосування такого методу, який проявляється в зменшенні теплонапруженості процесу різання, стабілізації якості поверхневого шару та можливості інтенсифікації режимних параметрів, що дає змогу підвищити ефективність процесу обробки. Складність застосування переривчастого абразивного оброблення вимагає застосування спеціального складнопрофільного різального інструменту з подальшим балансуванням в ході використання, що значно ускладнює процес його практичного застосування.

Дослідження температури з використанням експериментальних методів є найбільшим достовірним способом визначення температури в зоні різання, який дає змогу встановити реальні значення температури, що важко при теоретичних методах дослідження, які не дають змогу врахувати всі фактори впливу через надмірне спрощення реальності під час побудови моделей, відсутності адекватних емпіричних даних для перевірки, а також через суб'єктивні помилки в логічних висновках.

**Викладення основного матеріалу.** Принцип роботи вимірювальної системи дослідження температури при шліфуванні побудований на використанні термоелектричних датчиків температури з наступним підсиленням сигналу та цифровізацію його за допомогою аналого-цифрового перетворювача для зручності сприйняття та обробки інформації. На рисунку 1 представлена структурна схема вимірювального каналу.

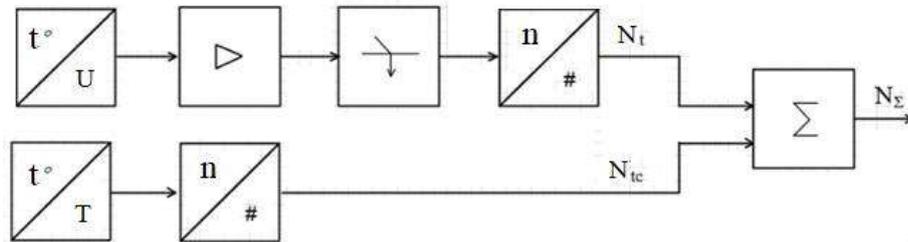


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального каналу

Датчики температури T1, T2 та T3 розміщуються у різних точках контакту різального інструменту з заготовкою в напрямку її руху з метою кращого її контролю. Для забезпечення більшої точності температури різання в ході обробки матеріалу використана компенсація температури холодних спаїв за рахунок застосування термічного блоку, який забезпечує мале значення градієнта температур між вільними кінцями термодавачів а значення їх температури забезпечується датчем ДТ.

Сформовані термоелектричними датчиками сигнали передаються в термоблок, в якому проходить компенсація через різницю гарячого та холодного спаю термопари, підвищуючи при цьому точність вимірювання. Напряга сформована термопарою складає мале значення ( 4,1276 мВ) на кожні 100 °С та при температурі навіть 1000 °С складе всього 41 мВ, що є досить малою величиною. З метою підвищення сигналу термопари вимірювальна система передбачає наявність підсилювачів постійного струму для подальшої передачі підсиленого сигналу вимірювальної інформації до мікроконтролера для цифровізації.

Значення напруги на виході термоелектричного датчика визначається наступною залежністю:

$$U_{ТП} = k_{ТП} \cdot (t_p - t_{xc}) \quad (1)$$

де  $k_{ТП}$  – коефіцієнт перетворення термоелектричного датчика;

$t_p$  – досліджувана температура;

$t_{xc}$  – значення температура холодного спаю термоелектричного датчика.

Забезпечення компенсації температури термопарі забезпечується датчиком TMP05, який має можливість перетворення температури на електричні імпульси з затримкою у часі залежно від величини температури

Датчик температури має наступну функцію перетворення вимірювального сигналу:

$$U_T = k_d \cdot t_p \quad (2)$$

де  $U_T$  – напруга датчика;

$k_d$  – коефіцієнт перетворення датчика;

$t_p$  – досліджувана температура

Вираз перетворення вимірювального каналу відповідно матиме вигляд:

$$N_t = U_t \cdot K_{пс} \cdot K_{ак} \cdot K_{ацп} \quad (3)$$

де  $N_t$  – цифровий код на виході;

$U_t$  – напруга з термоелектричного давача;

$K_{пс}$  – коефіцієнт підсилення;

$K_{ак}$  – коефіцієнт передачі сигналу аналоговим комутатором;

$K_{ацп}$  – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Перетворення сигналу холодного спаю термопарі описується виразом:

$$N_{tc} = T \cdot K_{ацп} \quad (4)$$

де  $T$  – час імпульсу;

$K_{ацп}$  – коефіцієнт перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Вираз сумарного перетворення вимірювального каналу матиме вигляд:

$$N = (U_t \cdot K_{пс} \cdot K_{ак} \cdot K_{ацп}) + (T \cdot K_{ацп}) \quad (5)$$

Похибка вимірювального каналу описується виразом [6]:

$$\gamma = \gamma_{пс} + \gamma_{ак} + \gamma_{ацп} \quad (6)$$

де  $\gamma_{пс}$  – приведена похибка підсилювача сигналу;

$\gamma_{ак}$  – приведена похибка передачі сигналу аналоговим комутатором;

$\gamma_{ацп}$  – приведена похибка перетворення сигналу аналого-цифровим перетворювачем.

Функціональна схема вимірювальної системи наведена на рисунку 2. Вимірювання температури різання починається з визначення контактних температур круга з заготовкою за допомогою термоелектричних давачів  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , які перетворюють її в аналогову термо ЕРС. Далі аналогові сигнали підсилюються та надходять на входи комутатора  $AIN1$ ,  $AIN2$ ,  $AIN3$  який перемикає їх поетапно один за одним які підсилюють надсилає його на вихід (OUT). З вихідного каналу комутатора вимірювальний сигнал передається до АЦП з наступним його перетворенням на цифровий. Далі сигнал надходить до мікроконтролера (CPU) для його обробки. Для підвищення точності, у вимірювальній системі передбачений датчик температури холодного спаю термопарі ( $T_{хс}$ ). Сигнал з нього надходить на цифровий вхід CPU та забезпечує компенсацію температури.

Процесор (CPU) забезпечує обробку цифрових даних та керує роботою інших частин системи, зберігаючи необхідні дані в пам'яті EEPROM та застосовуючи пам'ять (RAM) для накопичення інформації в ході обробки. Постійна пам'ять (PROM) застосовується для зберігання прошивки та необхідних програмних продуктів.

Слідкуючий таймер (WDT) здійснює контроль роботоздатності CPU та забезпечує його перезавантаження у разі його підвисання. Опрацьована інформація за допомогою приймача/передавача (UART) надходить на інтерфейс RS-485 для можливості дистанційної її передачі, який забезпечує передачу даних на великі відстані та можливості підключення додаткових пристроїв обробки інформації.

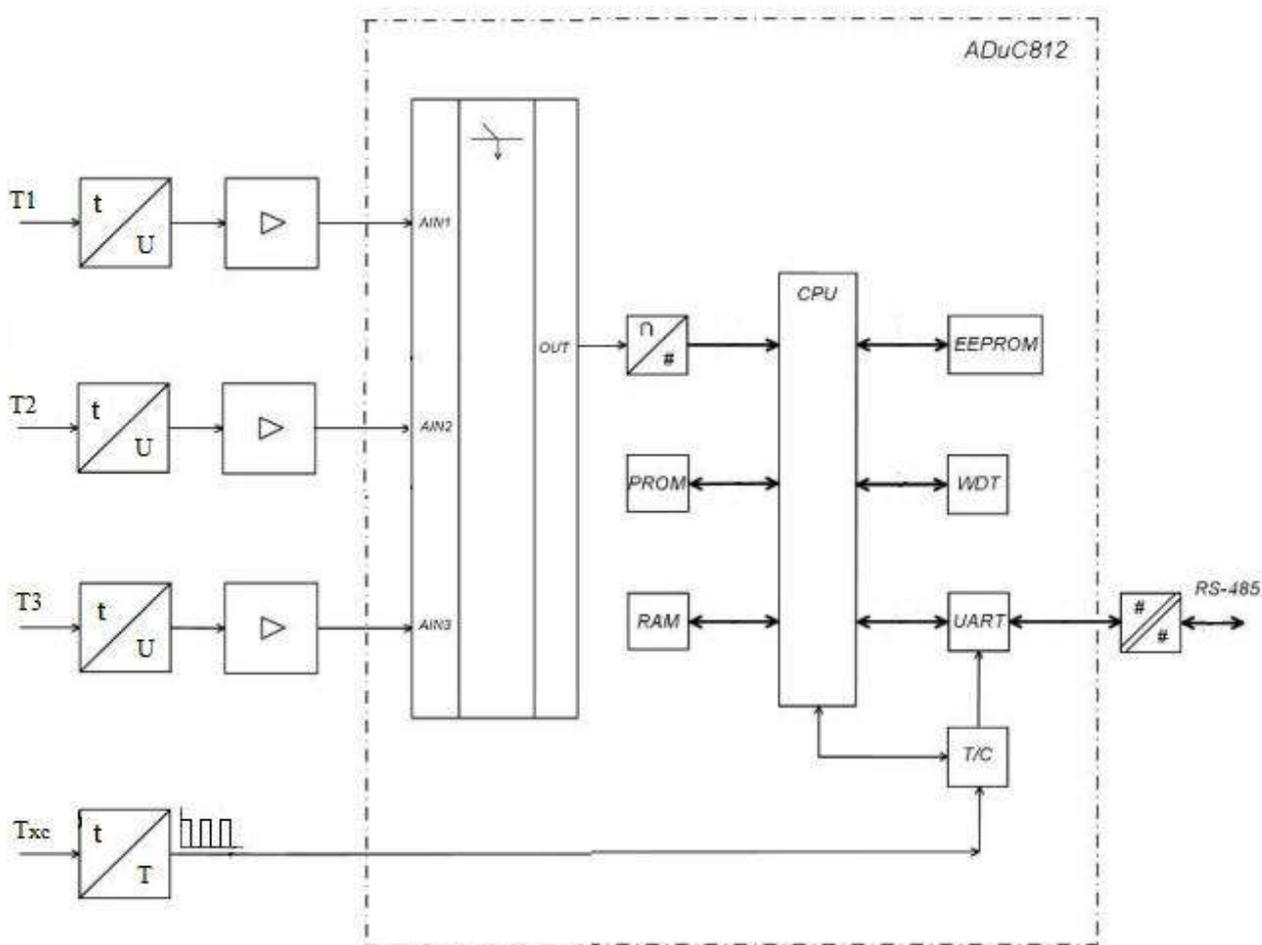


Рисунок 2 – Функціональна схема вимірювальної системи:

$T_1, T_2, T_3, T_4$  – термоелектричні давачі;  $T_{xc}$  – давач температури холодного спаю;  $\Delta$  – підсилювачі; CPU – процесор; PROM – постійний пристрій запам'ятовування; RAM – оперативна пам'ять; WDT – слідкуючий таймер; EEPROM – запам'ятовуючий пристрій з електричним стиранням; UART – інтерфейс;  $\Delta$  – комутатор; RS-485 – системний інтерфейс

Рівень температури на глибині  $\delta$  від поверхні заготовки можна знайти за формулою [7]:

$$T_{\delta, \max} = T_{0, \max} \left( 1 - 0.5 \sqrt{\frac{V}{ah}} \cdot \delta \right), \quad (7)$$

де  $T_{\delta, \max}$  – температури заготовки на глибині  $\delta$  від її поверхні;

$T_{0, \max}$  – допустиме значення температури поверхні заготовки в ході її абразивного оброблення;

$V$  – швидкість руху заготовки в зоні різання;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності середовища;

$h$  – напівширина теплового джерела;

$\delta$  – глибина зняття припуску.

Моніторинг та контроль рівня теплонапруженості процесу різання відбувається згідно алгоритму, зображеного на рисунку 4: В блоці умов заноситься допустиме значення температури різання матеріалу залежно від його фізичних властивостей та режимних параметрів. Відбувається порівняння реальної та допустимої температури різання. Електричний сигнал сформований термоелектричним давачем аналізується контролером та застосовується для управління швидкістю подачі заготовки в зону різання та теплонапруженістю процесу зокрема.

Дотримання допустимої температури шліфування дає змогу стабілізувати якість абразивної обробки та уникнути припиків та інших теплових дефектів.

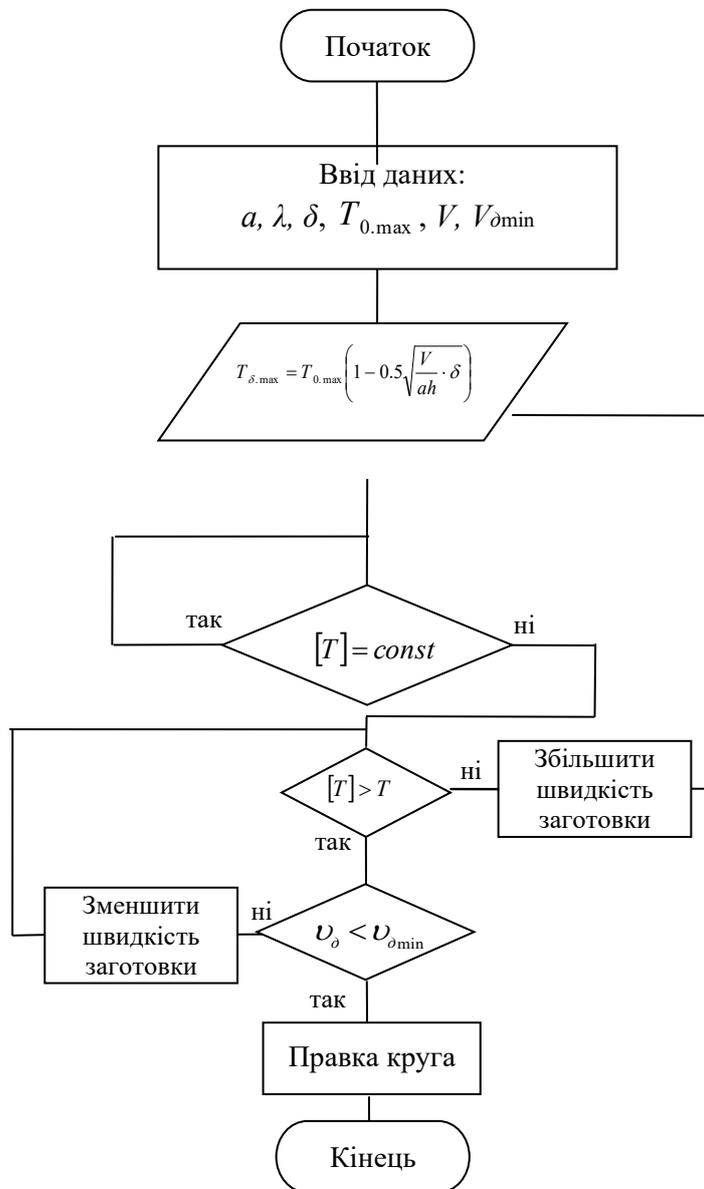


Рисунок 3 – Алгоритм контролю температури різання матеріалу в процесі його обробки

**Висновки.** Проведений аналіз показав, що процеси у функціональних блоках ІВС, зокрема АЦП, мають стохастичний характер, що потребує застосування методів ймовірнісного аналізу для оцінювання точності та прогнозування метрологічних характеристик. Запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміну стану вимірювальних засобів у часі та враховують як аналітичні, так і статистичні залежності між параметрами. Обґрунтовано доцільність застосування аналітико-ймовірнісного підходу до прогнозування стану ІВС, який поєднує точність математичного аналізу з гнучкістю статистичного моделювання стохастичних процесів.

Розроблена методологія дає можливість підвищити достовірність оцінювання точності блоків ІВС, скоротити ризики метрологічних відмов та забезпечити стабільність роботи програмно-визначуваних вимірювальних платформ у реальному часі. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та експлуатації сучасних ІВС для побудови систем автоматичного контролю точності та прогнозування метрологічної надійності їх компонентів.

**Інформаційні джерела**

1. Сьох О. М., Пташенчук В. В. Формування та дослідження мікрогеометрії торців кілець підшипників. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 114-115.
2. Пташенчук В. В., Васькевич В. О. Дослідження мікротвердості залізвуглецевих сплавів сформованих в середовищі швидкозмінного температурного поля. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.): збірник тез. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 101.
3. Температура макропереривчастого і мікропереривчастого шліфування. URL: <http://bornik.college.ks.ua/downloads/sbornik4/pdf/2.pdf> (дата звернення: 09.09.2025).
4. Визначення температури переривчастого шліфування. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Roru\\_2012\\_2\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Roru_2012_2_13) (дата звернення: 09.09.2025).
5. Зниження теплового фактору при плоском абразивне шліфування. URL: [http://dspace.op.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9915/1/tnt\\_2017\\_4\\_4.pdf](http://dspace.op.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9915/1/tnt_2017_4_4.pdf) (дата звернення: 09.09.2025).
6. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А., Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірвальних систем: навч. посіб. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.
7. Теплові процеси при звичайному та переривчастому шліфуванні: навчальний посібник / Якімов А. В. та інші. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/11156> (дата звернення: 12.10.2025).

**Network A., Ptashenchuk V.**

Lutsk National Technical University

**MEASURING SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING  
CUTTING DURING GRINDING**

*The article presents a system for monitoring the cutting temperature of materials during their processing. The structural and functional diagram of the measuring system is given. To determine the temperature of materials, especially during their technological processing (cutting, hardening), a thermoelectric sensor is used, which provides the necessary upper measurement threshold up to 1500°C and has high accuracy. High sensitivity and low inertia contribute to the use of sensors of this type for measuring the temperature of metal cutting. A measuring system for studying the temperature during grinding has been developed, built on the use of thermoelectric temperature sensors with subsequent signal amplification and its digitalization. The use of a microcontroller, isothermal block and optoelectronic block allows information processing, remote transmission and increasing its accuracy. The presented algorithm for controlling the thermal stress of the abrasive processing of metals and their alloys usually includes an analysis of existing thermal loads in the technological processing scheme and the use of technical means of temperature control and influence on it to ensure the stability of processing and avoid thermal defects.*

**Keywords:** *measuring system, temperature, grinding, control, algorithm, control.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
15.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
16.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УКД 621.315.592

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-18

Микитюк М. П., Островський І. П.

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В НАНОСТРУКТУРАХ  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 

У статті проведено огляд сучасних підходів до реалізації надпровідного стану в наноструктурах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  — топологічного матеріалу, перспективного для створення квантових логічних елементів. Розглянуто ключові механізми індукції надпровідності: епітаксійне гетероструктурування з  $\text{NbSe}_2$ , інтеркаляція атомів Ag, легування Sr, формування інтерфейсних фаз з Pd, а також контактна модифікація за допомогою сфокусованого іонного пучка. На основі експериментального порівняння проаналізовано, як змінюються критичні параметри ( $T_c$ ,  $V_{c2}$ ), морфологія та тип парування електронів залежно від обраного методу. Особливу увагу приділено результатам, отриманим у власному дослідженні над ниткоподібними кристалами  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , де зафіксовано двоступеневий перехід у надпровідний стан з  $T_{c1} = 5.3 \text{ K}$  і  $T_{c2} = 3.5 \text{ K}$  та високими критичними магнітними полями до 1.45 Тл. Показано, що інтеграція Pd у ґратку  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  призводить до формування об'ємної стабільної фази з ознаками нетрадиційної надпровідності та участю сильних електронних кореляцій. Порівняння з сучасними публікаціями дозволяє узагальнити вплив морфології, методу синтезу та типу металевого контакту на властивості надпровідного стану, а також підкреслити унікальність підходу, реалізованого в роботі, тому у цій роботі аналізуються особливості надпровідного стану в наноструктурах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  на основі порівняння власних експериментальних результатів з даними сучасної наукової літератури. Такий підхід дозволяє не лише верифікувати отримані результати, а й встановити характерні риси надпровідності, що виникає в різних умовах: при легуванні, інтерфейсному контакті, інтеркаляції або під тиском.

**Ключові слова:** наноструктури  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , надпровідність, нетрадиційні надпровідники, топологічні матеріали, критична температура, електрон-фононна взаємодія, магнітотранспорт.

**Постановка проблеми.** Серед великої кількості топологічних матеріалів сполука  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  займає особливе місце завдяки своїй простій кристалічній структурі, сильній спин-орбітальній взаємодії та наявності топологічно захищених поверхневих станів. Ці властивості роблять її перспективною платформою для реалізації надпровідності нового типу, зокрема топологічної надпровідності, що є ключовою для створення майоранових ферміонів та топологічних квантових обчислень.

Надпровідність у  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  може бути індукована різними способами: легуванням, створенням гетероструктур з іншими надпровідниками ( $\text{NbSe}_2$ , Pd), інтеркаляцією або дією високого тиску. Залежно від механізму індукції спостерігаються як прояви звичайної надпровідності BCS-типу, так і ознаки нетрадиційного спарювання, включно з переходами між типами Ізінга та Рашби. У багатьох випадках надпровідність виникає при низьких концентраціях носіїв заряду, що порушує класичні передумови BCS-теорії. Проте механізми такого спарювання залишаються недостатньо зрозумілими.

Незважаючи на значний інтерес до надпровідності в  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , кількісне порівняння характеристик різних типів структур (об'ємних, плівкових, інтерфейсних, ниткоподібних) на основі експериментальних даних залишається фрагментарним. Особливо бракує систематичних досліджень, які б пов'язували критичні параметри ( $T_c$ ,  $\Delta_0$ ,  $V_{c2}$ ,  $\xi$ ,  $T_c/\text{TF}$ ,  $A/\gamma^2$ ) із механізмами спарювання у різних морфологіях зразків

**Мета роботи.** Метою роботи є узагальнення сучасних експериментальних підходів до реалізації надпровідності у наноструктурах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , а також порівняння ключових надпровідних параметрів, отриманих у відомих системах (легованих, гетероструктурних, інтеркальованих), із результатами власних досліджень ниткоподібних кристалів  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Особливу увагу приділено аналізу характерних ознак нетрадиційної надпровідності: перевищення співвідношення  $\Delta_0/k_B T_c$  над класичним BCS-лімітом, збільшення параметра  $A/\gamma^2$  та відносного значення  $T_c/\text{TF}$ . Такий підхід дозволяє уточнити природу надпровідного стану у досліджених структурах та окреслити перспективи їх застосування в гібридних квантових системах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Індукована надпровідність у наноструктурах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  привертає значну увагу завдяки потенціалу реалізації топологічної надпровідності, яка є необхідною умовою для появи майоранових квазічастинок та побудови квантових логічних елементів. У сучасній літературі описано кілька підходів до отримання надпровідного стану в цьому матеріалі, зокрема гетероструктурування, легування, інтеркаляцію та індукцію під тиском.

Одним із найяскравіших експериментів є робота [1], де плівки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  були епітаксійно вирощені на одношаровій плівці  $\text{NbSe}_2$  методом молекулярно-променевої епітаксії. Фотонно-емісійна спектроскопія з кутовою роздільністю [2] проведена безпосередньо під час синтезу, а магнітотранспортні вимірювання після зростання плівки, показали, що збільшення товщини плівки призводить до переходу від надпровідності типу Ізінга [3] до надпровідності типу Рашби [4]. Цей перехід супроводжується появою об'ємних квантових ям із розщепленням Рашби та ослабленням верхнього критичного магнітного поля при паралельному полі. Результати свідчать про можливість керування типом спарювання куперів шляхом точного контролю над геометрією наноструктури.

Не менш важливими є дослідження індукованої тиском надпровідності в легованих кристалах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Зокрема, робота [5] присвячена вивченню зразків  $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  під високим тиском із використанням електротранспорту, Раман-спектроскопії [6] та синхротронної рентгенівської дифракції. Було показано, що в ромбоєдричній фазі посилення тиску знижує значення верхнього критичного поля ( $T_c$ ) через ослаблення взаємодії електронів з оптичними фононами. Натомість у проміжній моноклінній фазі  $T_c$  різко зростає на фоні підвищеної концентрації носіїв заряду та посиленого електрон-фононного зв'язку. В умовах високого тиску тетрагональна фаза демонструє надпровідність БКШ-типу [7], що є ознакою завершеного переходу матеріалу в металевий стан.

Іншим перспективним шляхом до індукції надпровідності є створення гетероструктур із металами. У роботі [8] було виявлено, що при осадженні Pd на поверхню  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  відбувається самочинне утворення інтерметалічної фази  $\text{PdBiSe}$  на межі поділу. Цей тонкий шар демонструє надпровідність із  $T_c$  близько 1,2–1,5 K, що підтверджено за допомогою ТЕМ-аналізу [9]. Цей механізм дає змогу реалізовувати надпровідні компоненти без використання легування або екстремальних умов.

Ще один приклад – дослідження [10], де була використана технологія сфокусованого іонного пучка [11] для виготовлення надпровідних пристроїв на основі  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Формування мікростовпів і каналів супроводжувалося локальною модифікацією матеріалу, що призвело до виникнення надпровідного транспорту. Такі структури мають практичну значущість для реалізації надпровідних інтерферометрів або квантових сенсорів.

Теоретичне підґрунтя для нових форм надпровідності у  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  демонструє робота [12], у якій моделюється інтеркаляція атомів Ag у міжшарові простори кристалу. Обчислення показали, що атоми срібла здатні значно змінювати електронну структуру матеріалу: відбувається зміщення рівня Фермі вгору та поява додаткових носіїв заряду. Це веде до збільшення густини електронних станів поблизу рівня Фермі  $N(E_F)$ , що є важливою передумовою для реалізації надпровідності.

Крім того, встановлено, що інтеркаляція Ag змінює топологічну природу поверхневих станів і може сприяти формуванню сприятливого електрон-фононного середовища для виникнення куперівських пар. Зокрема, обчислені значення електрон-фононної сталості  $\lambda$  та параметра спарювання свідчать про можливість реалізації нетрадиційної надпровідності навіть при порівняно низьких концентраціях домішки. Такий результат має значення не лише для розуміння механізму надпровідності, але й для практики — адже інтеркаляція є технологічно простим способом модифікації властивостей вже наявних наноструктур.

Таким чином, модель Ag-інтеркаляції доповнює експериментальні дані щодо легованих та гібридних структур на основі  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , розширюючи уявлення про можливі сценарії виникнення надпровідного стану в топологічних середовищах.

Показовими у контексті порівняння з власними дослідженнями є роботи [13] і [14], у яких продемонстровано надпровідність у гібридних структурах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  із металевими контактами. У [13] надпровідність виникає на межі розділу між  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  і шаром Nb без зовнішнього легування чи прикладеного тиску. Автори пов'язують її з утворенням інтерфейсної надпровідної фази, хоча точний механізм залишається предметом обговорення (рис.1). У [14] виготовлено мікроструктури з використанням сфокусованого іонного пучка, у яких металеві контакти (також

з Nb) формують джозефсоноподібні [15] з'єднання на базі  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , що проявляють характерну залежність критичного струму від температури та магнітного поля (рис.2).

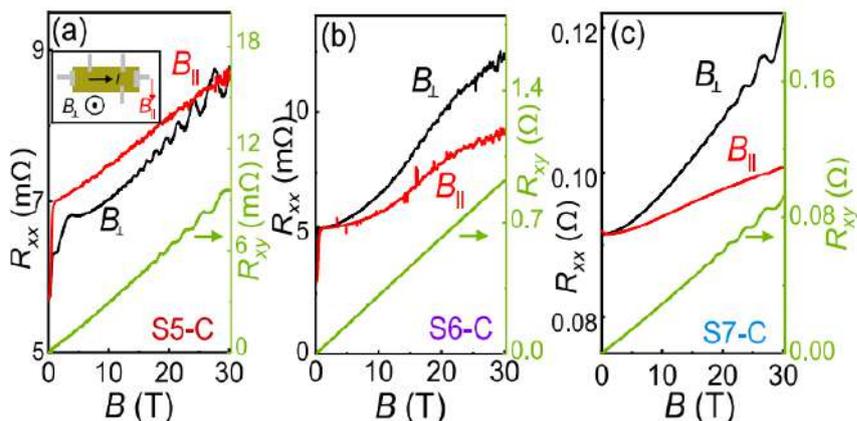


Рисунок 1 – Дані магнітоопору у сильному полі для трьох номінальних зразків  $\text{Nb}_{0.25}\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [13]: (a) S5-C, (b) S6-C та (c) S7-C при температурі 1.3 K, з вимірним поздовжнім і поперечним опором —  $R_{xx}$  та  $R_{xy}$  (зелена крива) — для магнітного поля до 30 Тл. Значення  $R_{xx}$  були отримані для напрямку поля перпендикулярного (чорна крива) та паралельного (червона крива) до поверхні зразка. Вставка на панелі (a) ілюструє розміщення контактів на зразках, з позначенням напрямку струму (I) відносно прикладених магнітних полів

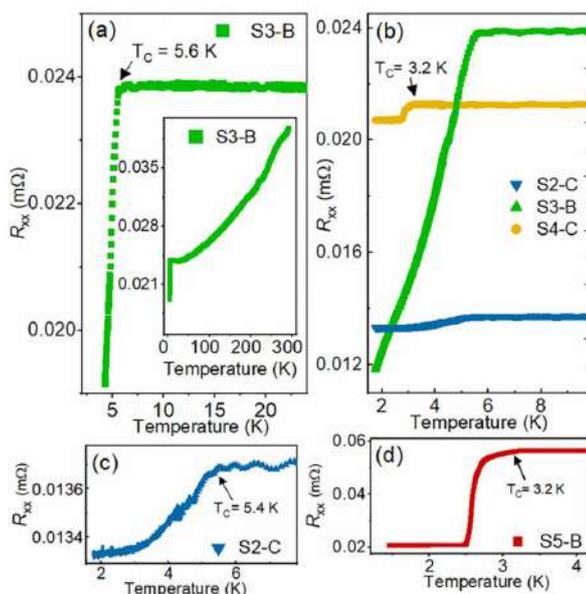


Рисунок 2 – Залежність електричного опору від температури для [14]: (a) зразка з високою критичною температурою  $T_c = 5.6$  K; вставка показує повний діапазон температур — від 300 K до 4.2 K. (b) трьох кристалів — S2-C, S3-B та S4-C. (c) збільшений фрагмент області переходу для зразка S2-C. (d) вимірювання для зразка S5-B.

Сукупність цих досліджень свідчить про багатогранність підходів до досягнення надпровідності в  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Важливим є те, що в усіх описаних випадках прояви надпровідності тісно пов'язані зі зміною просторової симетрії, електронної структури або фононної динаміки. Ці результати не лише поглиблюють розуміння механізмів незвичної надпровідності в топологічних матеріалах, але й прокладають шлях до створення стабільних гібридних платформ для квантових технологій.

**Основний зміст роботи.** Підходи, описані вище, перегукуються з нашими експериментами [16], у яких надпровідність виникає в ниткоподібних кристалах  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Однак у нашому випадку Pd інтегрується безпосередньо в кристалічну ґратку  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , формуючи об'ємну фазу зі стабільними надпровідними властивостями. Це підтверджено результатами енергодисперсійного аналізу та електротранспортних вимірювань, які демонструють

двоступеневий надпровідний перехід при  $T_{c1} = 5.3$  К і  $T_{c2} = 3.5$  К, а також критичне магнітне поле до 1.45 Тл (рис. 3).

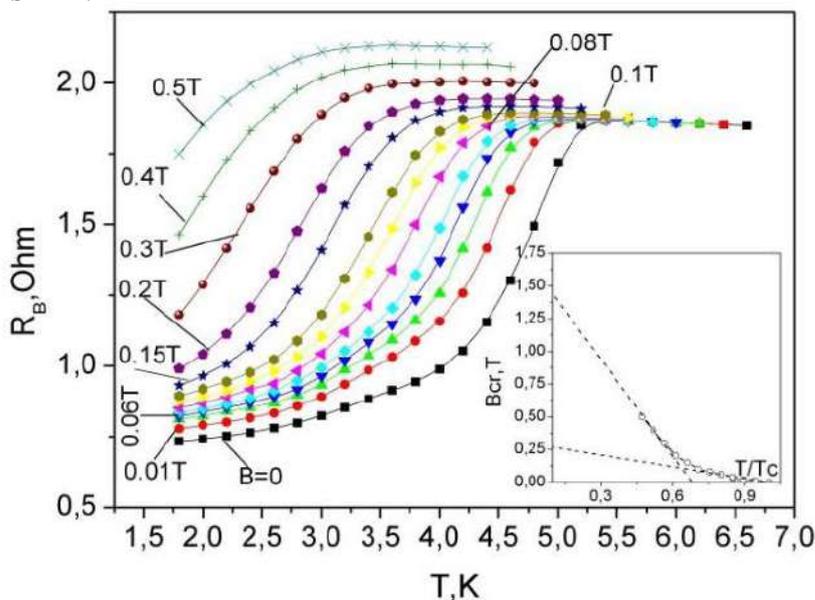


Рисунок 3 – Залежність опору від температури для ниткоподібного кристала  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  у температурному діапазоні 1.6–7 К при фіксованих магнітних полях. Вставка : Критична індукція магнітного поля для надпровідного стану в ниткоподібних кристалах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [16]

На відміну від робіт [13] та [14], де надпровідний стан є переважно інтерфейсним і реалізується в обмеженому наночарі або на межі контакту, в нашому випадку йдеться про об'ємну монокристалічну фазу з нетрадиційними характеристиками: відношення  $\Delta_0/k_B T_c \approx 2.0$  значно перевищує межу класичної BCS-теорії (1.76), а параметри  $A/\gamma^2$  і  $T_c/TF$  свідчать про вплив сильних електронних кореляцій. Кількісне порівняння критичних параметрів також підкреслює відмінність реалізованих надпровідних станів. У ниткоподібних кристалах  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ми фіксуємо критичні магнітні поля до 1.45 Тл, що суттєво перевищує значення, отримані у [13] ( $\sim 0.25$  Тл) та у [14] (в межах 0.1–0.3 Тл, залежно від геометрії контакту та типу з'єднання). Така різниця свідчить про вищу жорсткість надпровідного стану в об'ємних фазах порівняно з інтерфейсними або контактними реалізаціями. Крім того, наявність двоступеневого переходу в наших зразках із  $T_{c1} = 5.3$  К і  $T_{c2} = 3.5$  К також не має аналогів серед згаданих робіт, де спостерігаються одностадійні переходи з нижчими температурами. Це може вказувати на більш складну природу надпровідної фази в наших зразках, що, ймовірно, зумовлена структурною неоднорідністю, наявністю кількох фаз або відмінним механізмом утворення куперівських пар. Крім того, варто відзначити стабільність надпровідного стану в наших зразках за повторних температурних циклів, що свідчить про його об'ємний характер, на відміну від чутливих до дефектів інтерфейсних структур. Спостережене співвідношення  $\Delta_0/k_B T_c$  значно перевищує межу слабозв'язаної надпровідності, що підтверджує участь сильних електронних кореляцій. Така поведінка є характерною для нетрадиційних надпровідників і вирізняє  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  серед більшості легованих або контактено-індукованих систем. Отримані дані узгоджуються з сучасними теоретичними моделями, які передбачають можливість реалізації топологічної надпровідності у  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ -подібних матеріалах за умов внутрішнього легування.

Загалом, порівняння показує, що хоча всі три дослідження підтверджують можливість реалізації надпровідності в  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  без необхідності прикладати високий тиск або використовувати складне легування, конкретні властивості надпровідного стану значною мірою визначаються морфологією структури, вибором металу-контакту (зокрема, Nb) та методом його нанесення. Наша робота демонструє, що інтеграція Pd у об'ємну ґратку дозволяє досягти значно вищих критичних параметрів і стабільніших властивостей, ніж у випадках інтерфейсної надпровідності. Водночас схожість у поведінці, така як наявність крихкого надпровідного режиму при низьких температурах, підтверджує універсальні властивості  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  як середовища для нетривіальної надпровідності. Відмінності ж у структурі та умовах синтезу дають змогу глибше зрозуміти роль міжатомної взаємодії, розмірних ефектів і електронного середовища у формуванні надпровідного стану.

**Висновки.** У даній роботі узагальнено сучасні підходи до індукції надпровідного стану в наноструктурах на основі  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , зокрема через гетероструктурування з  $\text{NbSe}_2$ , легування Sr, інтеркаляцію Ag, формування інтерфейсних фаз із Pd та контактну модифікацію за допомогою FIB-технологій. Проаналізовано, як морфологія зразка, метод синтезу та природа металевого контакту впливають на критичні параметри надпровідності, тип парування електронів та стабільність надпровідного стану.

Особливу увагу приділено порівнянню власних результатів, отриманих на ниткоподібних кристалах  $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , з літературними даними. Показано, що інтеграція Pd безпосередньо в ґратку  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  призводить до формування об'ємної стабільної фази з високими критичними параметрами та ознаками нетрадиційної надпровідності. На відміну від інтерфейсних або контактноїндуктованих систем, така фаза демонструє підвищену жорсткість надпровідного стану та стійкість до повторних температурних циклів.

Отримані результати не лише узгоджуються з сучасними уявленнями про топологічну надпровідність, але й підкреслюють потенціал об'ємно легованих структур як платформи для стабільної реалізації нетривіальної надпровідності. У цьому контексті робота сприяє глибшому розумінню механізмів формування надпровідного стану в топологічних матеріалах та може слугувати основою для подальших досліджень у напрямку розробки квантових надпровідних елементів.

#### Інформаційні джерела

1. Yi H: Crossover from Ising-to Rashba-type superconductivity in epitaxial  $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{monolayer NbSe}_2$  heterostructures / Hu LH, Wang Y, Xiao R, Cai J, Hickey DR, Dong C, Zhao YF, Zhou LJ, Zhang R, Richardella AR. // *Nature Materials*. 2022 Dec; Vol. 21, Iss. 12. P. 1366-72. <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01386-z>
2. Boschini F: Time-resolved ARPES studies of quantum materials. / Zonno M, Damascelli A // *Reviews of Modern Physics*. 2024 Jan 1; 96(1):015003. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.96.015003>
3. Li W.: Recent progresses in two-dimensional Ising superconductivity / Huang J, Li X, Zhao S, Lu J, Han ZV, Wang H. // *Materials Today Physics*. 2021 Nov 1; 21:100504. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100504>
4. Gastiasoro MN.: Theory of superconductivity mediated by Rashba coupling in incipient ferroelectrics. / Temperini ME, Barone P, Lorenzana J. // *Physical Review B*. 2022 Jun 1;105(22):224503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.224503>
5. Li M.: Superconductivity and electron-phonon interaction in  $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  under pressure. / Fang Y, Kenney-Benson C, Wang L. // *New Journal of Physics*. 2021 Aug 9;23(8):083011. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac14cf>
6. Luo R.: Deep learning for Raman spectroscopy: A review. / Popp J, Bocklitz T. // *Analytica*. 2022 Jul 19;3(3) P. 287-301. <https://doi.org/10.3390/analytica3030020>
7. Bardeen J: Theory of superconductivity. / Cooper LN, Schrieffer JR. // *Physical review*. 1957 Dec 1;108(5) P. 1175. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>
8. Fan K.: Superconductivity at Pd/ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Interfaces Due to Self-Formed PdBiSe Interlayers. / Hua Z, Gu S, Zhu P // *Materials*. 2024 Nov 8;17(22):5460. <https://doi.org/10.3390/ma17225460>
9. Zhang S.: Precise analysis of nanoparticle size distribution in TEM image. / Wang C. // *Methods and protocols*. 2023 Jul 3;6(4) P. 63. <https://doi.org/10.3390/mps6040063>
10. Gracia-Abad R.: FIB-fabrication of superconducting devices based on  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  junctions. / Sangiao S, Balakrishnan G, De Teresa JM. // *Scientific Reports*. 2024 Oct 16;14(1):24294. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75576-x>
11. Li P.: Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: Fundamentals and applications. / Chen S, Dai H, Yang Z, Chen Z, Wang Y, Chen Y, Peng W, Shan W, Duan H. // *Nanoscale*. 2021;13(3):1529-65. <https://doi.org/10.1039/D0NR07539F>
12. Koley S.: Superconductivity induced by Ag intercalation in Dirac semimetal  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . / Basu S. // *Computational Materials Science*. 2022 Jul 1;210:110989. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110989>
13. Kevy SM.: Structural and electronic inhomogeneity of superconducting Nb-doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . / Lund HE, Wollesen L, Dalgaard KJ, Hsu YT, Wiedmann S, Bianchi M, Holt AJ, Curcio D. // *Physical Review B*. 2021 Feb 15;103(8):085107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.085107>

14. Kevy SM.: Large variation in superconducting transition temperature in the  $\text{NbxBi}_{2-x}\text{Se}_3$  system. / Wollesen L, Dalgaard KJ, Hsu YT, Wiedmann S, Bremholm M. // Physical Review Materials. 2024 May;8(5):054801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.8.054801>
15. Bobkova IV.: Magnetolectric effects in Josephson junctions. / Bobkov AM // Journal of Physics: Condensed Matter. 2022 Jun 30;34(35):353001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac7994>
16. Druzhinin AA.: Unconventional superconductivity in  $\text{PdxBi}_2\text{Se}_3$  whiskers. / Ostrovskii IP, Khoverko YM, Mykytiuk MP. // Physics and Chemistry of Solid State. 2023 Sep 26;24(3) P. 558-63. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.558-563>

**Mykytiuk M.P., Ostrovskii I.P.**

Lviv Polytechnic National University

#### **FEATURES OF SUPERCONDUCTIVITY IN $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ NANOSTRUCTURES: EXPERIMENTAL STUDY AND COMPARISON WITH LITERATURE DATA**

*This paper presents a review of current approaches to realizing the superconducting state in  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostructures — a topological material with promising applications in quantum logic devices. Key mechanisms of superconductivity induction are discussed, including epitaxial heterostructuring with  $\text{NbSe}_2$ , Ag intercalation, Sr doping, formation of Pd-based interface phases, and contact modification via focused ion beam (FIB) techniques. Based on experimental comparisons, the evolution of critical parameters ( $T_c$ ,  $B_{c2}$ ), morphology, and electron pairing type is analyzed depending on the method used. Special attention is given to the authors' own results on  $\text{PdxBi}_2\text{Se}_3$  whiskers, where a two-step superconducting transition was observed at  $T_{c1} = 5.3$  K and  $T_{c2} = 3.5$  K, along with upper critical magnetic fields reaching 1.45 T. It is shown that the integration of Pd into the  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  lattice leads to the formation of a bulk, stable phase with features of unconventional superconductivity and strong electronic correlations. A comparison with contemporary studies allows us to generalize the influence of morphology, synthesis method, and metal contact type on the properties of the superconducting state, and highlights the uniqueness of the approach implemented in this work. Accordingly, this study analyzes the nature of the superconducting state in  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostructures by comparing the authors' own experimental findings with recent literature data. This approach not only validates the obtained results but also reveals the characteristic features of superconductivity emerging under different conditions - including doping, interfacial contact, intercalation, or applied pressure.*

**Key words:**  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostructures, superconductivity, unconventional superconductors, topological materials, critical temperature, electron-phonon interaction, magnetotransport.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
05.09.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
25.10.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 519.6

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-19

**Новосад К. С.<sup>1</sup>, Никируй Л. І.<sup>2</sup>, Яремій І. П.<sup>2</sup>, Федосов С. А.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна<sup>2</sup>Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна<sup>3</sup>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**АНАЛОГОВІ І ЦИФРОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ**

*У сучасному світі оптичні технології відіграють важливу роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки і зберігання інформації. Оптичні аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі відіграють центральну роль у гібридних системах, де необхідно поєднувати безперервні аналогові сигнали з цифровим представленням інформації. Замість традиційного електронного підходу, оптичні АЦП/ЦАП використовують світлові хвилі для перетворення сигналів, що значно підвищує швидкість і знижує втрати енергії.*

*Нелінійні оптичні ефекти дозволяють реалізувати пристрої, здатні реагувати на зміну інтенсивності сигналу, змінювати свою поведінку в реальному часі та виконувати функції логіки, обчислень і фільтрації. Одним з найбільш поширених ефектів є ефект Керра, при якому показник заломлення середовища змінюється пропорційно до інтенсивності світла.*

*Аналогові оптичні системи, що створені на фотонних кристалах і нелінійних ефектах, демонструють різку швидкість та здатність до обробки сигналів у реальному часі. Водночас цифрові системи забезпечують точність, масштабованість і стійкість до завад, що є критично важливим для складних обчислювальних завдань, телекомунікацій і систем штучного інтелекту. Дослідження з використанням глибокого навчання для проєктування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії. Перспективи впровадження таких систем охоплюють не лише науку та промисловість, а й повсякденне життя: автономні транспортні засоби, медична діагностика, розумні міста, віртуальна реальність.*

**Ключові слова:** оптична система, АЦП, ЦАП, сигнал, інформація, фотонний кристалах, нелінійний ефект.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі оптичні технології відіграють важливу роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки і зберігання інформації. У контексті розвитку технологій оптичні системи, що працюють з фотонами замість електронів, відкривають нові можливості для створення енергоєфективних, високошвидкісних і адаптивних інформаційних технологій. Особливе значення має розвиток аналогових і цифрових оптичних систем, які формують основу сучасних телекомунікацій, обчислень, сенсорних мереж і систем штучного інтелекту.

**Аналіз останніх досліджень.** У дослідженні [1] розглядаються новітні підходи до реалізації оптичних аналогових і цифрових систем на основі огляду провідних наукових статей останніх років. Проведено оцінку сучасного стану та перспектив розвитку аналогових і цифрових оптичних інформаційних систем, також визначено їхні переваги, обмеження та потенціал практичного використання, зокрема, в оптичних обчисленнях, ШІ, промисловості й цифровому моделюванні.

Аналогові системи оптичного діапазону використовують безперервні зміни амплітуди, фази або частоти світлових хвиль для передавання інформації. Такі системи мають менше кроків обробки сигналів і зазвичай забезпечують нижчу затримку. У публікації [2] запропоновано використання глибоких нейронних мереж для розробки багатопарових просторових оптичних диференціаторів. Завдяки використанню машинного навчання вдалося досягти точного моделювання оптичних пристроїв, здатних до аналогових обчислень, таких як операції диференціювання. Це відкриває нові перспективи для створення аналогових процесорів, які працюють із зображеннями, сигналами й об'ємними даними в реальному часі [3].

Цифрові системи оптичного діапазону працюють на основі дискретних станів світлових хвиль (наприклад, двійкових 0 або 1), що дозволяє надійно кодувати, передавати і декодувати

інформацію. Ці системи особливо ефективні при інтеграції в цифрову інфраструктуру та комп'ютерні мережі [4].

**Мета роботи.** Вивчити і провести аналіз новітніх підходів до можливостей реалізації оптичних аналогових і цифрових систем, визначити їхні переваги та недоліки, обмеження та потенціал практичного застосування в інформаційних та автоматизованих системах.

**Виклад основного матеріалу.** У 2025 році було описано [5] використання нейронних мереж для проектування 2-бітного повністю оптичного цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) на основі фотонних кристалів. Для створення 2-бітного оптичного ЦАП використовується фотонно-кристалічна структура з квадратними ґратками  $15 \times 21$ , що складається з кремнієвих стрижнів у повітряному середовищі. Ця структура спеціально розроблена для створення фотонної забороненої зони в режимі ТМ, розташованої в діапазоні довжин хвиль  $1,42 \div 2,14$  мкм. Іншими словами, всі довжини хвиль у цьому діапазоні не пройдуть через структуру.

Для лазера, який зазвичай використовується у волоконно-оптичних телекомунікаціях, було обрано довжину хвилі 1,55 мкм. Оскільки ця довжина хвилі потрапляє в фотонну заборонену зону, вона не може поширюватися через структуру і тому може бути спрямована через хвилеводи [5]. Рисунок 1 відображає результати моделювання, пов'язані із зонною структурою, і підтверджується, що обрана довжина хвилі правильно потрапляє в фотонну заборонену зону, тим самим запобігаючи її проходженню через структуру.

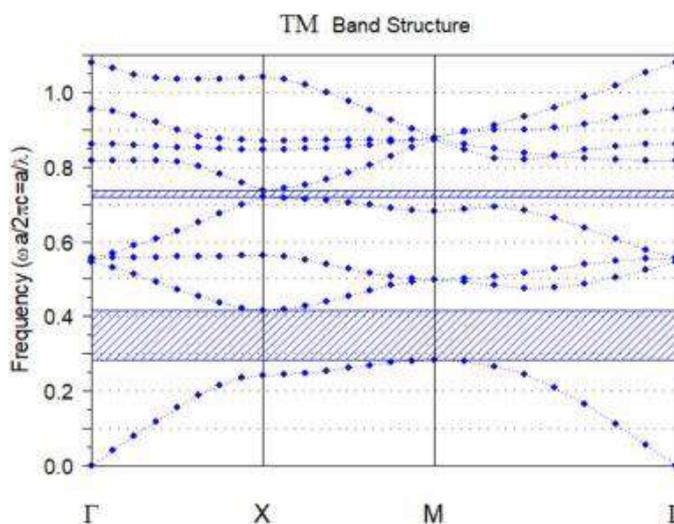


Рисунок 1 – Нормалізована діаграма фотонної забороненої зони

На рисунку 1 зображено нормалізовану діаграму фотонних зон для фотонного кристала в режимі ТМ. Кожна синя точка на графіку представляє фотонну смугу, що відповідає певному хвильовому вектору. Розташування цих смуг вказує на дозволені енергетичні стани. Затінені області на графіку представляють фотонні щілини, які є діапазонами частот, де фотонні стани заборонені. Ці щілини забороненої зони виділяють діапазони частот, які не можуть поширюватися всередині фотонного кристала. Іншими словами, діаграма підкреслює довжини хвиль, які блокуються фотонною смугою та перешкоджають передачі. Результати демонструють високу точність моделювання і значне зменшення габаритів пристрою, що є перспективним напрямом для фотоніки [5].

**Оптичні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі.** Оптичні аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі відіграють центральну роль у гібридних системах, де необхідно поєднувати безперервні аналогові сигнали з цифровим представленням інформації. Замість традиційного електронного підходу, оптичні АЦП/ЦАП використовують світлові хвилі для перетворення сигналів, що значно підвищує швидкість і знижує втрати енергії.

Оптичні аналого-цифрові перетворювачі	Оптичні цифро-аналогові перетворювачі
перетворює аналоговий світловий сигнал (наприклад, інтенсивність світла) в цифрову форму, представляючи його у вигляді послідовності бітів	виконує обернену операцію – перетворює цифровий код у аналоговий світловий сигнал

У 2003 році запропонована структура повністю оптичного АЦП [6], що базується на кільцевому резонаторі з нелінійністю типу Керра (див. рис. 2). Цей пристрій імітує метод послідовного наближення, де кожен біт кодується в окремому резонансному кільці, що реагує на інтенсивність вхідного сигналу. Ці схеми порівняно легко інтегруються в оптичні інтегральні схеми, забезпечуючи надвисоку щільність.

$E_{in_1}$  – вхідний оптичний сигнал, який подається на верхній горизонтальний хвилевід.  $K_1$  і  $K_2$  – дві області зв'язку, через які оптичний сигнал частково передається в кільцеву резонаторну структуру. **Кільце** – основний елемент резонатора, який виконує резонансне накопичення та інтерференцію сигналів.  $E_t$  – переданий сигнал, який проходить через перший хвилевід (вихідний порт).  $E_r$  – відбитий сигнал (Reflected Signal), який виходить через другий горизонтальний хвилевід.  $E_{in_2}$  – допоміжний вхідний сигнал, який може бути введений через нижній порт (Add Port).  $E_1, E_1', E_2, E_2'$  – поля в різних точках схеми. У кільцевому резонаторі, якщо матеріал (наприклад, кремній або нанокристалічний кремній) має нелінійні властивості, то при збільшенні інтенсивності світла в кільці: змінюється ефективна довжина хвилі резонансу, відбувається «оптичне перемикання» – тобто сигнал при певному рівні інтенсивності починає передаватися через інший порт, резонансна частота зсувається, що дозволяє реалізувати логіку, обробку сигналів або АЦП на основі принципу послідовного наближення.

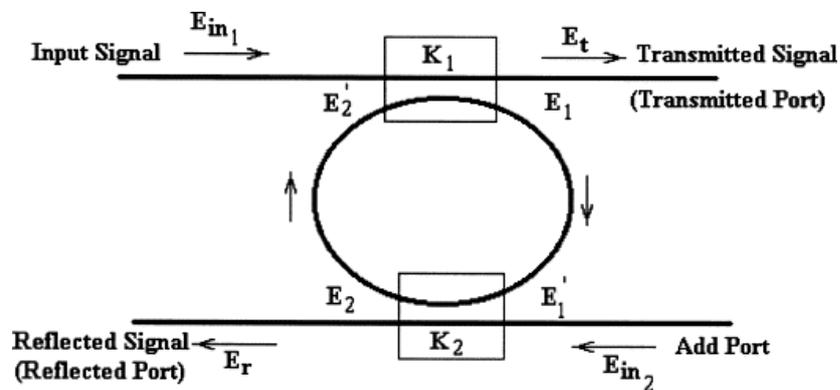


Рисунок 2 – Схема оптичного кільцевого резонатора з двома спряженими хвилеводами

У 2018 році було описано інноваційний підхід до створення 8-розрядного АЦП на основі фотонно-кристалічних кільцевих резонаторів восьмикутної форми (DR-ОСКР). Завдяки використанню фотонних кристалів з нанокристалічного кремнію як нелінійного середовища, вдалося досягти значної мініатюризації та високої енергоефективності [4].

Свою чергою, оптичний ЦАП був експериментально реалізований у 2019 році з використанням багатохвильового мультиплексування. Вхідні цифрові сигнали модулювалися на різних довжинах хвиль і дискретизували з використанням ультракоротких імпульсів. Це дозволило відтворювати аналоговий вихід із високою точністю та швидкістю понад 8 GS/s, що значно перевершує традиційні електронні рішення [7].

**Нелінійні ефекти та фотонні кристали в оптичних ІС.** Нелінійні оптичні ефекти дозволяють реалізувати пристрої, здатні реагувати на зміну інтенсивності сигналу, змінювати свою поведінку в реальному часі та виконувати функції логіки, обчислень і фільтрації.

Одним з найбільш поширених ефектів є ефект Керра, при якому показник заломлення середовища змінюється пропорційно до інтенсивності світла. Саме цей ефект активно використовується в кільцевих резонаторах, що є основою для багатьох оптичних АЦП. У 2018 році описали повністю оптичний АЦП з фотонного кристала, що функціонує при довжині хвилі 1550 нм – стандартній для телекомунікацій [4].

Фотонні кристали – це багатовимірні структури, що складаються з багаточислових діелектричних матеріалів з періодично низьким і високим індексом перелому. В результаті періодичної структури може бути створена фотонна заборонена зона. Завдяки їхній здатності контролювати поширення світла, фотонні кристали є базою для побудови оптичних логічних елементів, хвилеводів і фільтрів [8]. У 2020 році було запропоновано оптичний АЦП на основі нелінійних фотонно-кристалічних резонаторів, що демонстрував час наростання сигналу близько 1,5 пс, що є надзвичайно швидким результатом [9].

**Порівняльний аналіз аналогових і цифрових систем.** Аналогові та цифрові інформаційні системи в оптичному діапазоні мають як спільні риси, так і суттєві відмінності, що визначають їхню доцільність у конкретних сферах застосування:

Критерій	Аналогові системи	Цифрові системи
Принцип дії	Передача безперервних змін світлового сигналу: амплітуди, фази або частоти	Використання дискретних станів (0 і 1), імпульсів, модуляції або інтерференції
Точність і надійність	Вразливі до шумів, навіть малі спотворення можуть впливати на точність	Висока завадостійкість завдяки пороговій обробці та здатності до відновлення сигналу
Швидкодія	Надзвичайно швидкі, працюють без затримок у режимі реального часу	Досягають високих швидкостей (до Тбіт/с) у фотонних інтегральних схемах
Гнучкість і масштабованість	Обмежені, складно адаптуються до нових задач	Легко програмуються, масштабуються, сумісні з цифровими мережами і ШІ
Енергоспоживання	Дуже енергоефективні, особливо в обчисленнях без перетворення сигналів	Вищі витрати через необхідність перетворення, але поступово знижуються завдяки фотоніці

Обидва підходи мають свої переваги. Аналогові системи – надзвичайно швидкі й природні для реального середовища, але менш точні. Цифрові – більш надійні та універсальні, але потребують складної обробки сигналів. Саме тому новітні дослідження активно вивчають гібридні системи, які поєднують кращі риси обох підходів. Наприклад:

- аналогова обробка з цифровим керуванням;
- цифрова обробка з аналоговим захопленням сигналу (через оптичні АЦП).

Такі гібриди можуть стати основою майбутніх обчислювальних платформ: швидких, енергоефективних і універсальних.

**Перспективи розвитку та застосування.** Розвиток оптичних інформаційних систем є одним із ключових напрямів у сфері сучасних технологій. Завдяки своїм унікальним властивостям, оптичні аналогові та цифрові системи вже зараз знаходять застосування у критично важливих галузях.

*Оптичні АЦП/ЦАП нового покоління.* Завдяки фотонним кристалам та резонаторам з ефектом Керра вже зараз створюються надшвидкі аналого-цифрові перетворювачі. Майбутні версії зможуть:

- працювати на швидкостях до 10 Тбіт/с;
- бути інтегрованими у мікрочипи для смартфонів, лазерних радарів, медичних приладів;
- забезпечувати точну та швидку передачу сигналів у реальному часі.

*Нові матеріали і метаструктури.* Діелектричні метаповерхні, фотонні кристали з топологічним захистом і наноструктури дозволяють створювати компактні й адаптивні оптичні пристрої. Їх можна буде налаштовувати під конкретні задачі без механічного втручання – лише зміною інтенсивності чи частоти світла.

**Висновки.** Аналогові оптичні системи, зокрема ті, що сформовані на фотонних кристалах і нелінійних ефектах, демонструють різочу швидкодію та здатність до обробки сигналів у реальному часі. Водночас цифрові системи забезпечують точність, масштабованість і стійкість до завад, що є критично важливим для складних обчислювальних завдань, телекомунікацій і систем штучного інтелекту. Дослідження з використанням глибокого навчання для проектування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії. Перспективи впровадження таких систем охоплюють не лише науку та промисловість, а й повсякденне життя: автономні транспортні засоби, медична діагностика, розумні міста, віртуальна реальність. Оптичні системи вже сьогодні є компонентом цифрової трансформації, і в найближчі роки вони, без сумніву, змінять спосіб, яким людство генерує, передає та обробляє інформацію.

#### Інформаційні джерела

1. Новосад К., Никируй Л., Яремій І., Федосов С. Аналогові та цифрові інформаційні системи оптичного діапазону. *Problems of Computer Science, Software Modeling and Security of*

*Digital Systems* : Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf., June 09–11, 2025, Lutsk–Svityaz', Ukraine. Lutsk : Lesya Ukrainka Volyn Nat. Univ., 2025. P. 229-230.  
<https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/266>

2. Zhou Y., Chen R., Chen W. [et al.]. Optical analog computing devices designed by deep neural network. *Optics Communications*. 2020. Vol. 458. P. 124674.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124674>

3. Yang X., Wang D., Ren H. [et al.]. Optical analog computing for salient object detection in complex scenes via dielectric metasurface. *Physics Letters A*. 2024. Vol. 525. P. 129839.  
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129839>

4. Jafari D., Nurmohammadi T., Asadi M.-J., Abbasian K. All-optical analog-to-digital converter based on Kerr effect in photonic crystal. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 101. P. 138-143.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.007>

5. Karami P., Yahya S. I., Chaudhary M.-A. [et al.]. Design of a compact all-optical digital-to-analog converter based on photonic crystals using neural networks. *Results in Optics*. 2025. Vol. 19. P. 100802. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100802>

6. Rostami A., Rostami G. Full optical analog to digital (A/D) converter based on Kerr-like nonlinear ring resonator. *Optics Communications*. 2003. Vol. 228, № 1-3. P. 39-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2003.09.085>

7. Zhang T., Qiu Q., Su J., Fan Z., Xu M. Optical assisted digital-to-analog conversion using dispersion-based wavelength multiplexing. *Optics Communications*. 2019. Vol. 432. P. 44-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.09.025>

8. Khosroabadi S., Shokouhmand A., Marjani S. Full optical 2-bit analog to digital convertor based on nonlinear material and ring resonators in photonic crystal structure. *Optik*. 2020. Vol. 200. P. 163393. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163393>

9. Geng X., Zhao L. All-optical analog to digital converter based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. 2020. Vol. 41. P. 100817. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2020.100817>

**Novosad K.<sup>1</sup>, Nykyruy L.<sup>2</sup>, Yaremiy I.<sup>2</sup>, Fedosov S.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Lesia Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

<sup>2</sup>Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<sup>3</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

## ANALOG AND DIGITAL OPTICAL RANGE INFORMATION SYSTEMS

*In today's world, optical technologies play an important role in enabling high-speed transmission, processing, and storage of information. Optical analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters play a central role in hybrid systems that combine continuous analog signals with digital representation of information. Instead of the traditional electronic approach, optical ADCs/DACs use light waves to convert signals, which significantly increases speed and reduces energy loss. Nonlinear optical effects allow the implementation of devices that can respond to changes in signal intensity, change their behavior in real time, and perform logic, calculation, and filtering functions. One of the most common effects is the Kerr effect, in which the refractive index of a medium changes proportionally to the intensity of light. Analog optical systems based on photonic crystals and nonlinear effects demonstrate impressive speed and the ability to process signals in real time. At the same time, digital systems provide accuracy, scalability and immunity to interference, which is critically important for complex computing tasks, telecommunications and artificial intelligence systems. Research using deep learning to design optical devices indicates a new level of adaptability and automation in optical engineering. The prospects for the implementation of such systems cover not only science and industry, but also everyday life: autonomous vehicles, medical diagnostics, smart cities, virtual reality.*

**Keywords:** optical system, ADC, DAC, signal, information, photonic crystal, nonlinear effect.

Дата першого надходження  
статті до видання  
04.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
05.10.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 519.8: 004.6: 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-20

Олещук Т. С., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет

## МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ

*У роботі досліджено ключові аспекти оптимізації обслуговування клієнтів. Розроблено алгоритм та виконано програмну реалізацію динамічного управління кількістю функціонуючих кас, що адаптуються до поточної інтенсивності потоку клієнтів та довжини черг, з метою оптимізації часу очікування та завантаженості персоналу. Модель дозволяє оцінити такі ключові показники ефективності, як середній час очікування клієнтів, довжина черг, коефіцієнт завантаження кас, кількість клієнтів, що залишили чергу не дочекавшись обслуговування, та загальна кількість обслужених клієнтів. Результати симуляції можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо кількості та типів кас, стратегій управління персоналом та покращення клієнтського досвіду.*

**Ключові слова:** системи масового обслуговування, моделювання, черга, динамічне керування чергами.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі роздрібної торгівлі, де клієнти цінують свій час, ефективне управління чергами стало критично важливим для успіху супермаркетів. Проблема тривалого очікування в чергах є однією з найпоширеніших причин невдоволення покупців. Довгий час очікування або затримки в обслуговуванні викликають розчарування у покупців, що може призвести до погіршення загального враження від магазину. Неефективне керування чергами не лише дратує клієнтів, але й призводить до втрати потенційного доходу, оскільки покупці можуть покинути чергу або взагалі відмовитися від покупок у магазинах з довгими чергами. З іншого боку, добре організована черга сприяє підвищенню задоволеності клієнтів, а швидке та ефективне обслуговування на касі може безпосередньо збільшити обсяг продажів.

Сучасні споживачі, звикнувши до зручності та швидкості онлайн-магазинів, стають дедалі нетерплячішими щодо часу очікування у фізичних магазинах. Дослідження показують, що покупці готові чекати в черзі обмежений час, після чого їхня лояльність до магазину може знизитися. Тому для супермаркетів надзвичайно важливо не лише скорочувати фактичний час очікування, але й керувати сприйняттям цього часу клієнтами.

Моделювання роботи системи керування чергами є важливим інструментом для розуміння та оптимізації процесів обслуговування в супермаркетах. Воно охоплює аналіз потоку клієнтів, застосування теорії масового обслуговування та імітаційного моделювання, а також використання технологій для покращення ефективності черг. Мета такого моделювання полягає в мінімізації часу очікування, запобіганні скупченню людей та забезпеченні ефективного обслуговування.

**Метою роботи** є аналіз та розробка імітаційних моделей роботи системи керування чергами в супермаркетах, що дозволяють оцінити ефективність різних структур черг та стратегій динамічного управління касовими вузлами для підвищення якості обслуговування клієнтів та оптимізації роботи персоналу.

**Аналіз досліджень і публікацій.** В основі ефективної системи управління чергами в супермаркетах лежать кілька принципів. Перш за все, це організація та контроль потоку клієнтів, які очікують на обслуговування. Головна мета полягає у зменшенні часу очікування та забезпеченні справедливого та ефективного обслуговування кожного покупця. Системи керування чергами призначені для оптимізації процесу обслуговування клієнтів шляхом ефективного управління їхнім потоком. Вони спрямовані на те, щоб контролювати потік клієнтів, зменшувати час їх очікування, підвищувати продуктивність працівників та покращувати якість обслуговування [1].

Важливим аспектом є баланс між сподіваннями клієнтів щодо мінімального часу очікування та операційною ефективністю використання ресурсів супермаркету, таких як касири та каси. Ефективні системи керування чергами не лише організують лінії очікування, але й надають інструменти для систематичного управління потоком клієнтів та покращення їхнього досвіду протягом усього процесу обслуговування [2].

Ключовим принципом є також розуміння різниці між сприйнятим та фактичним часом очікування. На задоволеність клієнтів більше впливає те, скільки часу, на їхню думку, вони чекають, ніж реальна тривалість очікування [3]. Тому стратегії керування чергами повинні бути спрямовані не лише на скорочення фактичного часу очікування, але й на покращення психологічного досвіду очікування для клієнтів.

У роздрібній торгівлі, зокрема в супермаркетах, використовується кілька типів систем керування чергами, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Традиційні системи черг, також відомі як лінійні, базуються на принципі «перший прийшов – перший обслужений» [4]. У контексті супермаркетів це зазвичай означає наявність окремих черг до кожної каси, де покупці самостійно обирають, до якої саме черги стати.

Системи керування чергами з однією лінією функціонують за принципом, коли всі клієнти стоять в єдиній, зазвичай змієподібній черзі та прямують до першої вільної каси [5]. Такий підхід повністю усуває необхідність вибору черги, оскільки черга єдина, а розподіл клієнтів до кас відбувається автоматично або через направлення персоналу.

Віртуальні системи черг – це сучасний підхід до організації обслуговування, який усуває потребу у фізичних чергах. Клієнти реєструються дистанційно через мобільний додаток, веб-сайт або інтерактивний кіоск і отримують електронний номер у черзі. Інформація про статус їхнього очікування оновлюється в реальному часі, клієнт бачить своє місце, прогнозований час виклику та наближення своєї черги [6].

Системи черг на основі попереднього запису функціонують за принципом бронювання часу: клієнт заздалегідь обирає конкретний часовий слот для свого візиту [7]. Це дозволяє уникати живих черг і хаотичного накопичення людей у пікові години, створюючи прогнозований і контрольований потік відвідувачів.

Гібридні системи черг – це комплексні рішення, які поєднують функціональні елементи кількох типів чергування, зокрема лінійних, однолінійних, віртуальних і систем попереднього запису [8]. Такий підхід дозволяє максимально адаптувати систему обслуговування до реальних умов та потреб клієнтів.

Системи черг самообслуговування передбачають мінімальну участь персоналу в обслуговуванні клієнтів. У таких системах відвідувачі самостійно проходять усі етапи обслуговування – за допомогою інтерактивних кіосків, сканерів або мобільних додатків [9].

Пріоритетні системи черг організують обслуговування клієнтів не за черговістю прибуття, а за визначеними правилами пріоритету. Це можуть бути, наприклад, учасники програм лояльності, клієнти з меншою кількістю товарів або ті, хто оплатив преміум-доступ до послуг.

Інтелектуальні системи керування чергами базуються на застосуванні штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання для автоматичного аналізу поведінки клієнтів і операційних процесів. Їхній принцип роботи передбачає використання відеоаналітики для відстеження вхідного трафіку, довжини черг та швидкості обслуговування, а також інтеграцію з POS-системами і сенсорами для отримання точних і оперативних даних. Система в режимі реального часу прогнозує навантаження, виявляє затори та генерує рекомендації щодо розподілу персоналу або відкриття додаткових кас [10].

Основні підходи до моделювання управління обслуговуванням клієнтів у супермаркетах широкі – від класичної теорії масового обслуговування до імітаційних та інтелектуальних методів.

Аналіз черг базується на використанні методів теорії масового обслуговування, зокрема моделей типу M/M/1 і M/M/c, що забезпечують базові аналітичні оцінки часу очікування, завантаженості та ефективності обслуговування [11]. Проте через спрощені припущення ці моделі обмежені у застосуванні до реальних сценаріїв. Саме тому сучасні підходи дедалі більше орієнтовані на використання імітаційного моделювання та оптимізаційних алгоритмів.

Дискретна подієва імітація (DES) дозволяє моделювати послідовність дій у черзі з врахуванням варіативності поведінки клієнтів [12], а агентне моделювання (ABM) додає рівень автономності кожному учаснику системи – клієнту чи касиру [13]. Це забезпечує більш реалістичне відображення соціальної динаміки та виникнення небажаних явищ, таких як черги або колективне невдоволення.

Додатково, для пошуку оптимальних конфігурацій кас, що враховують обмеження на персонал, простір та змінні потоки клієнтів, ефективно використовуються евристичні алгоритми – зокрема генетичні (GA) [14] та ройові (PSO) [15]. Перші базуються на еволюційних принципах

природного добору, другі – на моделюванні колективної поведінки. Обидва дозволяють знаходити баланс між витратами та якістю обслуговування навіть у складних багатовимірних умовах.

У поєднанні з методами машинного навчання – такими як навчання з підкріпленням чи рекурентні нейронні мережі – сучасні системи управління чергами поступово трансформуються в адаптивні, самонавчальні платформи [16]. Вони здатні не лише реагувати на зміну ситуації, а й прогнозувати навантаження та змінювати конфігурацію обслуговування в реальному часі.

**Викладення основного матеріалу.** Об'єктом моделювання є система обслуговування клієнтів у типовому супермаркеті. Ця система включає клієнтський потік, що складається з різноманітних покупців (VIP, звичайні, літні), які прибувають з певною інтенсивністю та мають різні характеристики, такі як тип, пріоритет та терпіння.

До системи також входять касові зони, які поділяються як на звичайні каси, що обслуговуються касирами, так і каси самообслуговування. Клієнти обирають касу з найменшою чергою, а обслуговування в черзі відбувається за пріоритетним принципом. Ключовим компонентом об'єкта є система динамічного управління касами – алгоритм, який в реальному часі аналізує стан черг і приймає рішення про відкриття або закриття кас. Касові вузли можуть бути звичайними касами, касами самообслуговування та тимчасовими (додатковими) звичайними касами, що відкриваються та закриваються залежно від навантаження. Черги формуються з покупців перед кожною активною касою.

Основною метою моделювання є оцінка ефективності роботи супермаркету з динамічним управлінням касами, що включає адаптивне відкриття та закриття тимчасових кас на основі показників черг.

Алгоритм моделі описує систему обслуговування з чітким поділом клієнтів, організацією черг, управлінням касами та постійним спостереженням за процесом.

Клієнти поділяються на три групи: VIP, звичайні та літні люди. Для кожної групи встановлені свої правила – хто має вищий пріоритет, скільки часу триває обслуговування, скільки часу клієнт готовий чекати.

Кількість кас змінюється залежно від навантаження. Якщо покупців стає більше, відкриваються додаткові каси. Якщо менше – частина кас закривається. Клієнти автоматично переходять до нових кас.

Є система спостереження. Вона фіксує довжину черг, збирає дані по кожному типу клієнтів, а також оцінює, як працюють різні типи кас – звичайні та самообслуговування.

Для черг використовується структура даних, яка дозволяє швидко обробляти клієнтів за правилами: спочатку по пріоритету, далі по часу приходу, потім по порядку.

Клієнти з'являються випадково, але з урахуванням заданої частоти. Тип клієнта також обирається випадково.

Обслуговування враховує, що час може трохи змінюватися. Якщо клієнт чекає занадто довго, він може піти. Для кожного типу клієнтів визначено, скільки вони готові чекати. Якщо час перевищено – клієнт залишає чергу.

Алгоритм заснований на теорії масового обслуговування, що описує взаємодію клієнтів із системою черг і процесами обслуговування, охоплюючи надходження, очікування та обробку запитів.

У структуру алгоритму включено елементи пріоритетного планування та принципи адаптивного управління ресурсами, що дозволяє враховувати різні умови обслуговування залежно від типу клієнтів і навантаження на систему.

Функціонування алгоритму реалізовано на основі методів дискретно-подієвого моделювання, у межах якого зміни в системі відбуваються в моменти настання визначених подій.

Програмна реалізація моделі виконана на Python, як найбільш ефективному інструменті завдяки своїй гнучкості, широкому спектру спеціалізованих бібліотек (SimPy, Mesa, AgentPy, Queueing-tool, Salabim) та здатності поєднувати імітаційне моделювання з аналітикою й візуалізацією. Це забезпечує точність моделювання, масштабованість і адаптивність, що критично важливо для комплексного аналізу та оптимізації управління чергами в супермаркетах.

Модель показала, що середній час очікування клієнтів становить 1,95 хвилини. Час очікування переважно залишається низьким, система відкриває додаткові каси при перевищенні порогу в 8 хвилин, максимально до восьми активних кас. Більшість випадків (346 з 480) демонструють зниження часу очікування нижче 3 хвилин, що свідчить про можливість зменшення кількості відкритих кас в періоди низького попиту. Реакція системи на зміни

навантаження має ступінчастий характер і інерційність, що іноді призводить до затримок у балансуванні пікових навантажень. Водночас у 98,1 % випадків підтримується стабільність у кількості активних кас.

Довжина черг варіюється від 0 до 8 осіб з середнім значенням 3,26. Черги швидко змінюються на коротких проміжках часу, що впливає на час очікування. Наприкінці симуляції спостерігається накопичення навантаження. Звичайні каси мають середню завантаженість 59,75 % з різкими коливаннями, тоді як каси самообслуговування працюють стабільніше та з вищою середньою завантаженістю 71,48 %. Відсутність випадків втрати клієнтів свідчить про надійність системи.

Час очікування різниться за категоріями клієнтів та типом кас. На звичайних касах пріоритетні покупці чекають в середньому 2,89 хвилин, літні – 5,28 хвилин. Каси самообслуговування скорочують час для пріоритетних до 2,97 хв і звичайних до 3,24 хв. Для літніх покупців час на самообслуговуванні зростає до 7,58 хв, що свідчить про складнощі в користуванні цим типом кас і вимагає додаткової уваги.

Система динамічного керування чергами ефективно адаптується до змін потоку клієнтів і запобігає втратам клієнтів.

**Висновки.** Модель дозволяє оцінити такі ключові показники ефективності, як середній час очікування клієнтів, довжина черг, коефіцієнт завантаження кас, кількість клієнтів, що залишили чергу не дочекавшись обслуговування, та загальна кількість обслужених клієнтів. Результати симуляції можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо кількості та типів кас, стратегій управління персоналом та покращення клієнтського досвіду.

#### Інформаційні джерела

1. How to Choose the Best Queue Management System. URL: <https://waitwell.ca/resources/articles/a-guide-to-queue-management-systems/> (дата звернення: 18.07.2025).
2. Design Principles for Effective Digital Queue Management. URL: <https://www.nemo-q.com/blog/design-principles-digital-queue-management/> (дата звернення: 18.07.2025).
3. A Complete Guide to Queue Management Systems. URL: <https://facit.ai/insights/queue-management-system> (дата звернення: 18.07.2025).
4. Single-Line Queues Vs Multiple-Line Queues: Which One Is Better? URL: <https://www.qminder.com/blog/queue-management/single-line-vs-multiple-line-queues/> (дата звернення: 18.07.2025).
5. Single-Line Queues Vs Multiple-Line Queues: Which One Should You Choose? URL: <https://blog.shrivra.com/single-line-queues-vs-multiple-line-queues-which-one-should-you-choose/> (дата звернення: 18.07.2025).
6. Comprehensive Guide to Queue Management Systems. URL: <https://www.queuebee.com.sg/resources/blog/guide-to-queue-management-system-all-you-need-to-know.php> (дата звернення: 18.07.2025).
7. Retail Queue Management System. URL: <https://qwaiting.com/industries/retail-queue-system> (дата звернення: 18.07.2025).
8. Transforming In-Store Experiences With Modern Queue Management. URL: <https://www.mytotalretail.com/article/transforming-in-store-experiences-with-modern-queue-management/> (дата звернення: 18.07.2025).
9. Enhancing the Customer Experience with Self-Checkout and Queuing. URL: <https://www.cspdailynews.com/snacks-candy/enhancing-customer-experience-self-checkout-queuing> (дата звернення: 18.07.2025).
10. How Intelligent Video Analytics Transformed Retail Stores. URL: <https://www.iotforall.com/how-intelligent-video-analytics-transformed-retail-stores> (дата звернення: 18.07.2025).
11. Application of Queuing Theory: Analysis of Services of Grocery Bazaar (GB) Supermarket, Akesan, Lasu Igando, Lagos State, Nigeria. URL: <https://www.irjweb.com/VII6IRJEdT-9.pdf> (дата звернення: 18.07.2025).
12. Chapter 3 – General Principles. URL: [https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/SS/L19540\\_Modeling\\_and\\_Performance\\_Analysis\\_with\\_Simulation/03.pdf](https://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/SS/L19540_Modeling_and_Performance_Analysis_with_Simulation/03.pdf) (дата звернення: 18.07.2025).

13. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC128598/> (дата звернення: 18.07.2025).

14. Genetic Algorithm. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html> (дата звернення: 18.07.2025).

15. Particle swarm optimization (PSO). URL: [https://procaccia.info/courses/15381f16/c\\_slides/781f16-26.pdf](https://procaccia.info/courses/15381f16/c_slides/781f16-26.pdf) (дата звернення: 18.07.2025).

16. Queue-Learning: A Reinforcement Learning Approach for Providing Quality of Service. URL: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/16123/15930> (дата звернення: 18.07.2025).

**Oleshchuk T., Gumeniuk L.**

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

## MODEL OF A SUPERMARKET WITH DYNAMIC QUEUE MANAGEMENT

*The paper investigates key aspects of customer service optimization. A model has been developed and software implementation of dynamic control of the number of operating cash desks that adapt to the current intensity of customer flow and queue length has been performed in order to optimize waiting time and staff workload. The model allows you to evaluate such key performance indicators as the average customer waiting time, queue length, cash register utilization rate, the number of customers who left the queue without waiting for service, and the total number of customers served. The simulation results can be used to make informed decisions about the number and types of cash registers, human resource management strategies, and customer experience.*

**Keywords:** *queuing systems (QMS), modeling, queue, dynamic queue management.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
19.10.2025 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
21.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 621.865.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-21

**Пилипець М. І., Денисюк В. Ю.**

Луцький національний технічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОКООРДИНАТНИХ П'ЄЗОПРИВОДНИХ СКАНЕРІВ

У роботі представлено результати математичного моделювання динамічних характеристик двокоординатного п'єзоприводного сканера, призначеного для високоточного відтворення зображень у системах лазерного сканування та оптичного позиціонування. Запропоновано узагальнену розрахункову модель, що враховує взаємодію пружних елементів у двох площинах сканування та просторовий характер деформацій. Отримано аналітичні залежності для визначення кутів відхилення дзеркала і нижчої власної частоти системи з урахуванням геометричних та фізико-механічних параметрів елементів конструкції. Проведено чисельний аналіз впливу відносного діаметра пружного стержня на амплітуду кутових відхилень і власну частоту сканера. Показано, що максимальний кут сканування досягається при оптимальному співвідношенні діаметра та довжини пружних стержнів. Розроблена модель дозволяє виконувати оптимізацію конструктивних параметрів для підвищення ефективності двокоординатних п'єзосканерів і може бути використана при створенні мікромеханічних маніпуляторів та оптичних систем високої точності.

**Ключові слова:** п'єзопривод, двокоординатний сканер, біморфний елемент, математичне моделювання, кут сканування, власна частота, оптимізація.

**Постановка проблеми.** У сучасних оптико-механічних системах, зокрема в лазерних скануючих пристроях і високоточного позиціонування, важливою складовою є п'єзоелектричні приводи, що забезпечують мікро- та нанопереміщення з високою точністю. Проте більшість існуючих теоретичних моделей і практичних реалізацій обмежуються аналізом однокоординатних п'єзоприводів, які не відображають складних динамічних процесів, характерних для багатокоординатних систем.

У двокоординатних п'єзоприводних сканерах взаємодія кількох п'єзоелектричних елементів, пружних стержнів і жорстких елементів створює просторово-складну деформаційну схему, що істотно впливає на динамічні характеристики системи, кути сканування та власні частоти коливальності.

Недостатня кількість узагальнених математичних моделей, які враховують ці фактори, ускладнює процес оптимізації геометричних і конструктивних параметрів сканерів для досягнення максимальних кутів сканування при збереженні високої частотної характеристики та компактності конструкції.

Тому актуальним завданням є побудова математичної моделі двокоординатного п'єзоприводного сканера, що описує взаємодію пружних елементів у двох площинах сканування, дозволяє оцінити динамічну поведінку системи та забезпечує можливість оптимізації її параметрів.

**Проблема дослідження.** Проблема досліджень полягає у визначенні впливу геометричних і фізико-механічних параметрів пружних елементів двокоординатного п'єзоприводного сканера – зокрема відношення діаметра пружного стержня до його довжини, жорсткості ресор із біморфними п'єзоелементами та типу з'єднання елементів – на амплітуду кутових відхилень дзеркала й нижчу власну частоту системи.

Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити узагальнену математичну модель пружної системи сканера, яка б адекватно описувала її динаміку, дозволяла здійснювати аналітичне та чисельне моделювання, а також проводити оптимізацію конструктивних параметрів з метою підвищення ефективності сканування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання створення п'єзоелектричних приводів і скануючих систем є об'єктом активних наукових досліджень у галузі мікро- та наномеханіки, прецизійного приладобудування та оптоелектроніки. У сучасних публікаціях розглядаються теоретичні та експериментальні аспекти роботи п'єзоактюаторів, зокрема моделювання їх статичних і динамічних характеристик, вплив геометричних параметрів і матеріальних властивостей на точність і стабільність переміщень [1, 2]. Значна увага приділяється аналізу

однокоординатних систем на основі біморфних п'єзоелементів, які забезпечують високу точність позиціонування та компактність конструкцій [3, 4].

Розроблено низку математичних моделей, що описують поведінку п'єзоелектричних елементів у вигині, крутінні та при комбінованих навантаженнях. Ці моделі дозволяють оцінювати деформації, напружено-деформований стан та динамічну реакцію систем у різних режимах збудження. Однак переважна більшість робіт присвячена системам з однією ступенню вільності, де взаємодія між приводами не враховується або моделюється спрощено [5, 6].

У випадку двокоординатних п'єзоприводних сканерів, які забезпечують відхилення дзеркала в двох площинах, залишається недостатньо вивченим вплив взаємного зв'язку між жорсткими та гнучкими елементами конструкції. Лише окремі дослідження розглядають питання узгодження частотних характеристик двох ортогональних каналів керування, а також вплив співвідношення діаметра і довжини пружних стержнів на амплітуду кутових відхилень [7-9].

Актуальною науковою задачею є створення узагальненої математичної моделі двокоординатного п'єзоприводного сканера, яка б дозволила дослідити взаємодію елементів системи, визначити закономірності зміни кутових відхилень дзеркала залежно від конструктивних параметрів і розрахувати власні частоти пружної системи. Такі моделі є необхідними для подальшої оптимізації конструкцій сканерів, що застосовуються в системах лазерного запису та відтворення інформації, у прецизійних вимірювальних пристроях, а також в офтальмологічних візуалізаційних системах.

**Метою роботи** є розроблення математичної моделі двокоординатного п'єзоприводного сканера, що враховує взаємодію пружних елементів у двох площинах сканування, і дозволяє визначити кутові відхилення дзеркала та нижчу власну частоту системи залежно від геометричних і фізико-механічних параметрів елементів конструкції.

На основі моделі передбачається провести оптимізацію параметрів пружної системи для досягнення максимальних кутів сканування при фіксованій амплітуді керуючої напруги та заданих габаритах пристрою.

**Викладення основного матеріалу.** Для дослідження динамічних характеристик двокоординатного п'єзоприводного сканера розглянемо його узагальнену конструктивну схему, що складається з двох п'єзоелектричних приводів, розташованих взаємно перпендикулярно та з'єднаних з пружною системою, яка забезпечує просторове відхилення дзеркала.

Кожен п'єзоелектричний привід являє собою біморфний п'єзоелектричний елемент, здатний згинатися під дією прикладеної напруги, створюючи кутове переміщення у відповідній площині. Взаємодія між пружними елементами призводить до складного характеру деформації, який необхідно враховувати при побудові математичної моделі системи.

Для опису динамічної поведінки сканера приймемо низку спрощень, що не впливають суттєво на точність результатів. Зокрема, вважаємо, що деформації п'єзоелектричних елементів є малими, матеріал пружних елементів – ізотропним, а процес збудження відбувається в гармонічному режимі.

З урахуванням зазначених припущень рівняння руху системи можна подати у вигляді диференціальних залежностей, які описують зміну кутів відхилення дзеркала у функції часу та конструктивних параметрів сканера.

Для збільшення кута сканування, що еквівалентно або зменшенню габаритів пристрою, або розширенню області сканування, запропоновано конструкцію, зображену на рисунку 1. На чотирьох плоских металевих ресорах 1 встановлені п'єзокерамічні пластинки 2, які утворюють біморфний п'єзоелектричний привід (БПП). При подачі напруги пластинки згинаються і передають згинальні моменти на дзеркало 3 через пружні стержні 4, унаслідок чого дзеркало повертається в площині дії моментів.

Резонансний режим роботи п'єзоприводного сканера передбачає гармонійну залежність кута гойдання дзеркала від часу. Тому система відтворення зображення має включати елемент компенсації передачі даних, що враховує поточний кут нахилу дзеркала.

Наведена схема паралельного з'єднання чотирьох БПП забезпечує вихідній ланці – дзеркалу 3 – три ступені вільності: хитання навколо двох осей і поступальне переміщення вздовж осі. Якщо ж вихідна ланка системи зазнає підвищених механічних навантажень, жорсткість пристрою можна збільшити, ввівши паралельні ланки з БПП у кожне з чотирьох плечей трикоординатної пружної системи (рис. 1).

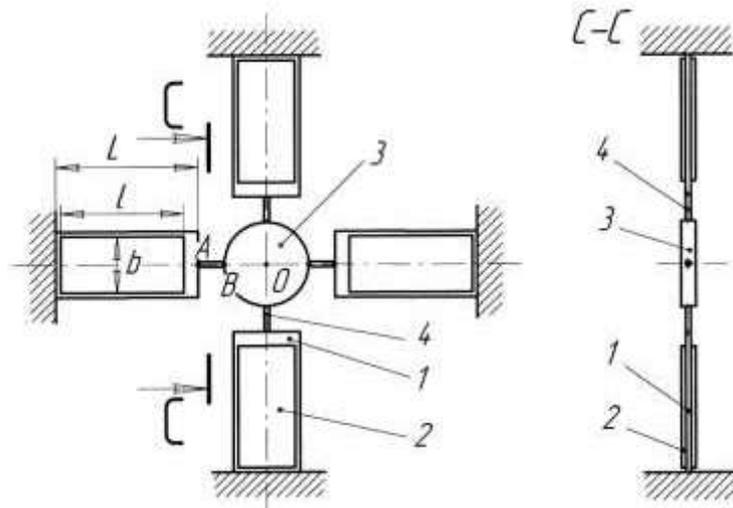


Рисунок 1 – Багатокоординатна маніпуляційна система з БПП

Основним завданням розрахунку двокоординатного скануючого пристрою є визначення залежностей кутів сканування від параметрів пружної системи та напруги, прикладеної до БПП. Крім того, здійснюється оптимізація параметрів із метою досягнення максимального кута сканування при фіксованій амплітуді напруги та сталих габаритах пристрою.

Пружна система сканера включає відносно жорсткі елементи – плоскі ресори з БПП 1 та 2 і дзеркало 3, а також відносно гнучкі елементи – пружні стержні 4. Вважаємо, що ресори з БПП мають нескінченну жорсткість на кручення, а дзеркало є абсолютно жорстким тілом. При одночасному відхиленні дзеркала в двох площинах усі чотири пружні стержні зазнають просторового (складного) вигину, при цьому напрямки векторів сил змінюються.

Для збереження постійного пружного опору зовнішнім впливам стержні повинні мати круглий поперечний переріз. Тому важливим фактором, що визначає кути повороту дзеркала, є відношення діаметра пружного стержня до його довжини. Одним із завдань моделювання є дослідження впливу цього відношення на кут повороту дзеркала.

Як розрахункову модель сканера розглядаємо статично невизначну пружну систему (рис. 2, а), що складається з однієї ресори з БПП, пружного стержня та половини дзеркала. Зовнішній вплив на неї описується еквівалентним моментом  $M_E$ , який відповідає дії напруги  $U$ , прикладеної до БПП. У точці гойдання дзеркала  $O$  діє момент опору  $M_0$ , що виникає внаслідок скручування перпендикулярних пружних стержнів, які зв'язують п'єзоприводи з дзеркалом. Момент  $M_0$  пропорційний куту повороту дзеркала  $\theta_0$ . Для подальшого аналізу систему доцільно розбити на дві частини, замінивши відкинуті елементи реакціями.

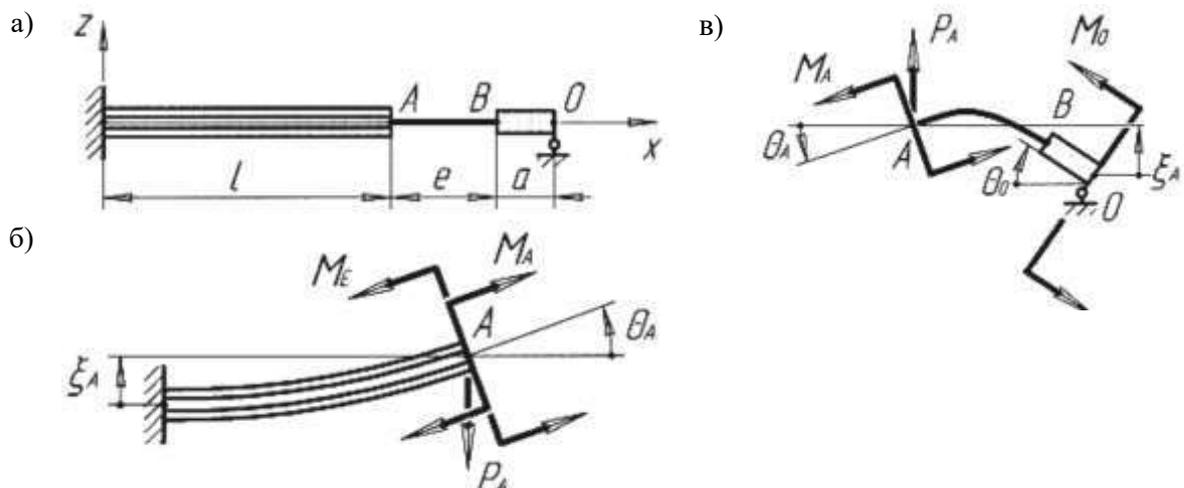


Рисунок 2 – Розрахункова схема двокоординатного сканера: а – загальна схема, б – схема ресори з БПП, в – схема половини дзеркала з пружним стержнем

Реакції, що діють уздовж осі  $x$ , не враховуємо, тому що згинальні моменти, що виникають при їх дії, вкрай незначні внаслідок малості кутів повороту перерізів (не більше  $3^\circ$ ). При зазначеному напрямку осі  $x$  кут повороту ресори з БПП в точці А визначається за формулою (1):

$$\theta_A = (M_E - M_A)\lambda_B l - \frac{P_A}{2}\lambda_B l^2, \quad (1)$$

де  $\lambda_B$  – податливість перерізу БПП;

$M_A$  і  $P_A$  – реактивний момент і реакція в точці А з боку відкинutoї частини системи.

Переміщення точки А по осі  $z$  визначається за формулою (2):

$$\xi_A = \frac{(M_E - M_A)}{2}\lambda_B l^2 - \frac{P_A}{3}\lambda_B l^3. \quad (2)$$

Для другої підсистеми, що включає пружний стержень та половину дзеркала, складемо рівняння статки (3):

$$P_A(e + a) = M_A + M_0. \quad (3)$$

Оскільки аналізу підлягає лише половина пружної системи сканера, кут повороту дзеркала визначається з виразу (4):

$$\theta_0 = -M_0 e \lambda_{ep}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{ep}$  – крутильна податливість перерізу пружного стержня.

Слід зазначити, що знак « $\rightarrow$ » у виразі (4) використано тому, що поворот дзеркала на поданій схемі відбувається за годинниковою стрілкою, тоді як позитивним напрямком вважається обертання проти годинникової стрілки. Крутильна податливість перерізу  $\lambda_{ep}$  пов'язана зі згинальною податливістю пружного стержня  $\lambda_e$  співвідношенням (5):

$$\lambda_{ep} = (1 + \mu_e)\lambda_e, \quad (5)$$

де  $\mu_e$  – коефіцієнт Пуассона для матеріалу пружного стержня, так як

$$G_e = \frac{E_e}{2(1 + \mu_e)},$$

де  $G_e$  – модуль зсуву;

$E_e$  – модуль пружності матеріалу пружного стержня.

Згинальна податливість перерізу круглого стержня визначається за формулою (6):

$$\lambda_e = \frac{64}{E_e \pi (d_e e)^4}, \quad (6)$$

де  $d_e = \frac{d}{e}$ ,  $d$  – діаметр пружного стержня.

Враховуючи (3) і (4), отримаємо вираз (7):

$$P_A = A_0 \cdot M_A + B_0 \cdot \theta_0, \quad (7)$$

де  $A_0 = (e + a)^{-1}$  і  $B_0 = -[\lambda_{ep} e (e + a)]^{-1}$ .

Оскільки дзеркало є абсолютно жорстким тілом, тому переміщення точки В можна визначити за формулою (8):

$$\xi_B = -a\theta_B, \quad (8)$$

причому  $\theta_B = \theta_0$ , а знак « $\rightarrow$ » поставлений в (8) через те, що кут повороту негативний, а переміщення точки В позитивне.

Диференціальне рівняння зігнутої осі пружного стрижня має вигляд:

$$\theta' = \lambda_e (P_A x - M_A),$$

а з урахуванням (7), отримаємо:

$$\theta' = \lambda_e [(A_0 M_A + B_0 \theta_B) x - M_A]$$

Двічі проінтегрувавши дане рівняння, визначимо залежності кута повороту перерізу і переміщення осі пружного стержня від координати  $x$ :

$$\begin{aligned} \theta &= \lambda_e [(A_0 M_A + B_0 \theta_B) x^2 - M_A x] + C, \\ \xi &= \lambda_e \left[ \frac{1}{6} (A_0 M_A + B_0 \theta_B) x^3 - \frac{1}{2} M_A x^2 \right] + Cx + D, \end{aligned}$$

де  $C$  і  $D$  – постійні інтегрування.

Постійну  $C$  знайдемо з умови  $\theta(x=e) = \theta_B$ :

$$C = \frac{1}{2} \lambda_e e (eA_0 - 2) M_A + \left(1 - \frac{1}{2} \lambda_e e^2 B_0\right) \theta_B,$$

постійну  $D$  знайдемо з умови  $\xi(x=e) = \xi_B$  і (8):

$$D = \frac{1}{6} \lambda_e e^2 (2eA_0 - 3) M_A + \left(\frac{1}{3} \lambda_e e^3 B_0 - a - e\right) \theta_B.$$

Кут повороту перерізу в точці А ( $x=0$ ) визначається за формулою (9):

$$\theta_A = C = -\frac{1}{2} \lambda_e e (eA_0 - 2) M_A + \left(1 - \frac{1}{2} \lambda_e e^2 B_0\right) \theta_B. \quad (9)$$

Переміщення в точці А за формулою (10):

$$\xi_A = D = \frac{1}{6} \lambda_e e^2 (2eA_0 - 3) M_A + \left(\frac{1}{3} \lambda_e e^3 B_0 - a - e\right) \theta_B. \quad (10)$$

З іншого боку, кут повороту перерізу ресори з БПП у точці А можна обчислити за формулою (1) з урахуванням виразу (7):

$$\theta_A = -\frac{1}{2} \lambda_e l \frac{2e+2a+l}{e+a} M_A + \lambda_B l M_E + \frac{1}{2} \lambda_B l^2 \frac{1}{\lambda_{ep} e(e+a)} \theta_B. \quad (11)$$

Переміщення ресори з БПП в точці А визначимо з формул (2) і (7):

$$\xi_A = \frac{1}{6} \lambda_B l^2 \frac{3e+3a+2l}{e+a} M_A + \frac{1}{2} \lambda_B l^2 M_E + \frac{1}{3} \lambda_B l^3 \frac{1}{\lambda_{ep} e(e+a)} \theta_B. \quad (12)$$

Прирівнявши кути  $\theta_A$  у формулах (9) і (11) і прирівнявши переміщення  $\xi_A$  у формулах (10) і (12), отримаємо систему двох рівнянь відносно  $M_A$  і  $\theta_B$ :

$$\begin{cases} -\frac{1}{2} \lambda_e e (eA_0 - 2) M_A + \left(1 + \frac{1}{2} \lambda_e e^2 B_0\right) \theta_B = -\frac{1}{2} \lambda_B l \frac{2e+2a+l}{e+a} M_A + \lambda_B l M_E + \frac{1}{2} \lambda_B l^2 \frac{1}{\lambda_{ep} e(e+a)} \theta_B; \\ \frac{1}{6} \lambda_e e^2 (2eA_0 - 3) M_A + \left(\frac{1}{3} \lambda_e e^3 B_0 - a - e\right) \theta_B = -\frac{1}{6} \lambda_B l^2 \frac{3e+3a+2l}{e+a} M_A + \\ + \frac{1}{2} \lambda_B l^2 M_E + \frac{1}{3} \lambda_B l^3 \frac{1}{\lambda_{ep} e(e+a)} \theta_B. \end{cases} \quad (13)$$

Розглянута система має розв'язок при  $\forall d_e$  крім випадку  $d_e = 0$ , так як при  $d_e \rightarrow 0$  пружний стержень вироджується в струну, яка не має згинальної жорсткості. Відповідно, кут повороту поперечного перерізу ресори з БПП в точці А  $\theta_A$  не дорівнює куту нахилу в точці А виродженого в струну пружного стержня. Систему рівнянь (13), з урахуванням співвідношення (5), було розв'язано за допомогою символьного процесора програмного комплексу MathCad. Нижче наведено лише числові значення кута  $\theta_B$  для окремого випадку ( $a=0$ ), оскільки аналітичні вирази розв'язків системи рівнянь (13) мають надто громіздкий вигляд. Розглянутий окремий випадок ( $a=0$ ) відповідає розрахунковій схемі сканера, зображеній на рисунку 3. Згідно з цією схемою, дзеркало 1 радіусом  $r_0$  жорстко закріплено у точці О, яка є місцем перетину двох перпендикулярних пружних стержнів 2.

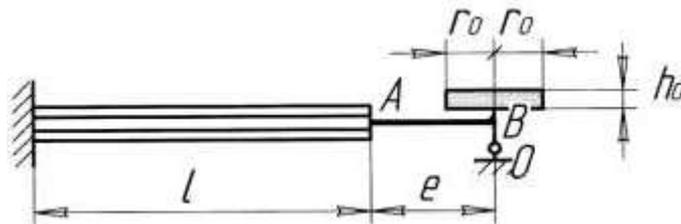


Рисунок 3 – Розрахункова схема сканера при  $a=0$

Для визначення максимального кута повороту при фіксованому значенні довжини пружного стержня  $e$  проаналізуємо залежності кута повороту дзеркала  $\theta_0$  ( $\theta_0 = \theta_B$ ) від відносного діаметра пружного стержня  $d_e$ .

Ці залежності в аналітичному вигляді представляють собою довгі математичні вирази, тому розглянемо ці функції для конкретного чисельного прикладу при наступних значеннях

параметрів:  $l = 5,0 \cdot 10^{-2}$  м,  $b = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h_M = 0,10 \cdot 10^{-3}$  м,  $h_P = 0,80 \cdot 10^{-3}$  м,  $a = 0$ ,  $E_M = 0,71 \cdot 10^{11}$  Па (дюралюміній),  $E_e = 1,0 \cdot 10^{11}$  Па (олов'яно-фосфорна бронза),  $\mu_e = 0,34$ ,  $s_{11}^E = 10,7 \cdot 10^{-12}$  Па<sup>-1</sup>,  $d_{31} = 1,35 \cdot 10^{-10}$  Кл/Н, (п'єзокераміка ЦТБС-3). Розрахунки проводилися при  $U = 500$  В і при трьох значеннях параметра  $e$ . На рисунку 4 наведені залежності кута повороту дзеркала  $\theta_0$  (в градусах) від відносного діаметра пружного стержня  $d_e$  ( $\theta_{1_{00}}$  – при  $e = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м,  $\theta_{2_{00}}$  – при  $e = 10,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $\theta_{3_{00}}$  – при  $e = 15,0 \cdot 10^{-3}$  м).

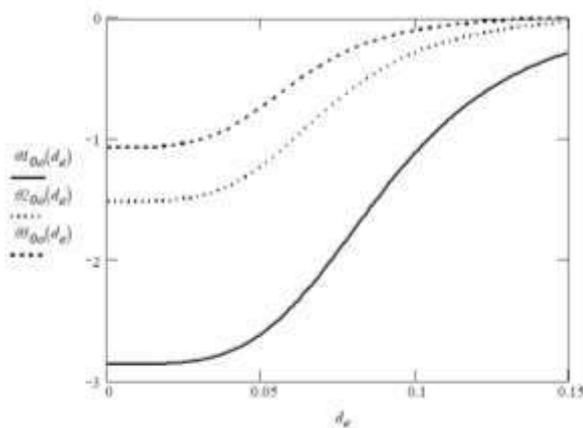


Рисунок 4 – Залежність кута повороту дзеркала  $\theta_0$  (в градусах) від відносного діаметра пружного стержня  $d_e$ . при трьох значеннях його довжини  $e$  ( $\theta_{1_{00}}$  – при  $e = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м,  $\theta_{2_{00}}$  – при  $e = 10,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $\theta_{3_{00}}$  – при  $e = 15,0 \cdot 10^{-3}$  м)

Графіки залежності показують, що максимальне значення кута повороту дзеркала теоретично досягається при  $d_e = 0$ , проте це неприйнятно. В діапазоні  $0 \leq d_e \leq 0,05$  кут мало залежить від  $d_e$  і залишається на максимальному рівні, тому необхідно дотримуватися верхньої межі діапазону при проектуванні подібних пристроїв. Далі відбувається різке зменшення  $\theta_0$ , і практично при  $d_e > 0,15$  кут  $\theta_0 \cong 0$ . Такий характер залежності можна пояснити тим, що в (13) параметр  $d_e$  побічно присутній в четвертій і восьмій ступенях. Таким чином, вплив цього параметра на кут повороту дуже великий. Тому при проектуванні систем з аналогічною кінематикою необхідно ретельно підбирати  $d_e$ . Негативне значення кута  $\theta_0$  у всьому діапазоні зміни аргументу (рис. 4) пояснюється тим, що поворот відбувається за годинниковою стрілкою.

Заслуговує на увагу порівняння кута  $\theta_0$  для значення  $d_e = 1,0 \cdot 10^{-4}$  (наприклад, на графіку при  $e = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м кут повороту дзеркала  $\theta_0 = -2,9^\circ$ ) з кутом повороту дзеркала аналогічної пружної системи, в якій пружний стержень в точці А має шарнірне з'єднання з ресорою з БПП (рис. 5). Для неї кут  $\theta_0 = \frac{\xi_A}{e} = -0,037 = -2,1^\circ$ . Порівняння показує, що кут повороту дзеркала при наявності жорсткого з'єднання з пружним стержнем малого діаметра більше на 26 % кута повороту для шарнірного з'єднання. Це пояснюється тим, що при жорсткому з'єднанні ресори з пружним стержнем в точці А він згинається по дотичній до пружної лінії ресори (на рисунку 5 вигнутий стержень показаний пунктирною лінією). Далі по осі  $x$  пружний стержень перегинається, маючи максимум переміщення  $\xi$  між точками А і В ( $0 < x < e$ ), тому кут  $\theta_0$  буде більше кута між віссю  $x$  і прямою, що з'єднує точки А і О (як при шарнірному з'єднанні в точці А).

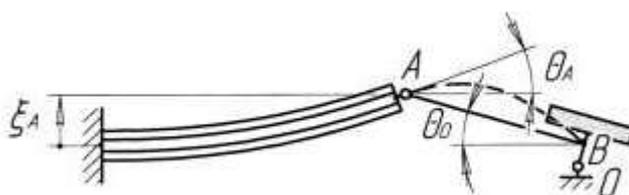


Рисунок 5 – Схема пружної системи сканера з шарніром в точці А

Отриманий в даному чисельному прикладі діапазон амплітудних значень кута від  $1^0$  до  $3^0$  задовольняє сучасним вимогам, що пред'являються до лазерних сканерів для відтворення інформації з лазерних дисків. Дана кінематична схема може бути використана для мікроманіпулятора, вихідна ланка якого має можливість крім гойдальних рухів в двох площинах здійснювати поступальний рух по осі  $z$ . Цей рух відтворюється при подачі напруги однієї полярності на всі БПП.

Для наближеного розрахунку нижчої власної частоти за методом Релея необхідно визначити максимальні потенціальну і кінетичну енергію пружної системи.

Потенціальна енергія двох ресор з БПП визначається виразом (14):

$$E_B^P = 2E_{BM}^P + 2E_{BP}^P, \quad (14)$$

де  $E_{BM}^P = \frac{(M_E - M_A)\theta_A}{2}$  – потенціальна енергія деформованої ресори з БПП при дії еквівалентного моменту і реактивного моменту в точці А;

$$E_{BP}^P = -\frac{P_A \xi_A}{2} \text{ – потенціальна енергія деформованої ресори з БПП при дії реакції в точці А}$$

(знак « $\leftarrow$ » у виразі поставлений у зв'язку з тим, що напрямок  $P_A$  протилежний напрямку переміщення  $\xi_A$ ).

У формулі (14)  $M_A$  визначається з розв'язку системи (13),  $\theta_A$  – з (1),  $P_A$  – з (7), а  $\xi_A$  – з (2).

Потенціальна енергія двох деформованих вигином пружних стержнів має вигляд (15):

$$E_e^P = 2(E_{eM}^P + E_{eP}^P + E_{e0}^P), \quad (15)$$

де  $E_{eM}^P = \frac{M_A \theta_A}{2}$  – потенціальна енергія пружного стержня під дією реактивного моменту  $M_A$ ,

$$E_{eP}^P = -\frac{P_A \xi_A}{2} \text{ – потенціальна енергія пружного стержня під дією реакції } P_A,$$

$$E_{e0}^P = \frac{M_0 \theta_0}{2} \text{ – потенціальна енергія пружного стержня під дією реактивного моменту } M_0 \text{ (знак}$$

« $\leftarrow$ » в виразі поставлений у зв'язку з тим, що напрямок  $M_0$  протилежний напрямку  $\theta_0$ ). У формулі (15)  $\theta_0$  визначається з (13).

Потенціальна енергія пружної системи сканера дорівнює сумі енергій її частин:

$$E^P = E_B^P + E_e^P. \quad (16)$$

Кінетична енергія пружної системи визначається виразом (17):

$$E^K = E_0^K + 2E_B^K, \quad (17)$$

де  $E_0^K = \frac{I_0 \bar{\theta}_0^2}{2}$  – кінетична енергія дзеркала, що коливається момент інерції якого визначається

$$\text{формулою } I_0 = \frac{m_0(h_0^2 + 3r_0^2)}{2};$$

$m_0$  – маса дзеркала;

$$E_B^K = \frac{33}{140} \cdot \frac{m_B \bar{\xi}_B^2}{2} \text{ – кінетична енергія консольно закріпленої ресори з БПП, яка коливається;}$$

$m_B$  – маса ресори з БПП.

Слід зазначити, що кінетичну енергію коливних пружних стрижнів у розрахунках не враховано, оскільки їх маса на один-два порядки менша за масу інших елементів пружної системи, а швидкості руху є близькими до швидкостей цих елементів.

Враховуючи, що амплітудні швидкості визначаються виразами  $\bar{\theta}_0 = \omega \theta_0$  і  $\bar{\xi}_A = \omega \xi_A$  і прирівнюючи потенціальну енергію з (16) кінетичною енергією системи (14), отримаємо наближену формулу для визначення нижчої власної частоти двокоординатного сканера:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E^P}{\frac{I_0 \bar{\theta}_0^2}{2} + \frac{33}{140} \cdot \frac{m_B \bar{\xi}_B^2}{2}}}. \quad (18)$$

Результати розрахунку нижчої власної частоти за формулою (18) при зазначених вище параметрах системи і при  $h_0 = 2,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_0 = 2,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $m_0 = 6,1 \cdot 10^{-5}$  кг (густина матеріалу дзеркала –  $\rho_0 = 2,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>),  $m_B = 5,9 \cdot 10^{-3}$  кг представлені на рисунку 6.

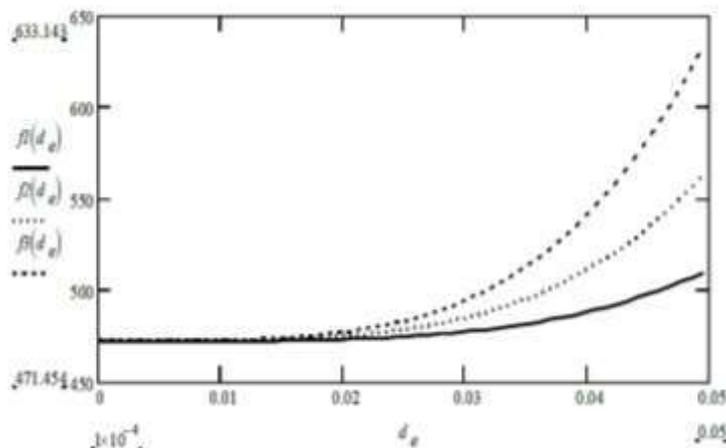


Рисунок 6 – Залежність власної частоти  $f$  (в Гц) від відносного діаметра пружного стержня  $d_e$  при трьох значеннях його довжини  $e$  ( $f_1$  при  $e = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $f_2$  – при  $e = 10,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $f_3$  – при  $e = 15,0 \cdot 10^{-3}$  м)

Із графіків видно, що значення власних частот  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  при збільшенні параметра  $d_e$  прямують до певної граничної величини (у наведеному чисельному прикладі –  $f_0 = 470$  Гц). У досліджуваному діапазоні зміни  $d_e$  спостерігається плавне зростання власних частот. При подальшому збільшенні  $d_e$  відбувається різкий стрибок значень частот. При цьому виявляється певний парадоксальний ефект: за меншої довжини стержня  $e$  швидкість зростання власної частоти системи є більшою. Цей ефект пояснюється тим, що жорсткість пружного стержня пропорційна четвертому степеню  $d_e$  і лише другому степеню довжини  $e$ . Слід зазначити, що достовірність розрахунку нижчої власної частоти описаним методом зменшується зі збільшенням  $d_e$ , оскільки запропонована модель не повною мірою враховує фізичні процеси, що відбуваються в пружній системі, коли жорсткість перерізу пружних стержнів стає порівнянною із жорсткістю перерізу ресори з БПП.

Для оцінювання точності результатів порівняємо отримані значення власної частоти системи з нижчою власною частотою одиночної консольно закріпленої ресори з БПП. Її можна визначити за наближеною формулою (19):

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{140}{33} \cdot \frac{3}{m_B l^3 \lambda_B}}. \quad (19)$$

Підставивши в (19) зазначені вище чисельні значення параметрів ресори з БПП, отримаємо значення власної частоти  $f_B = 410$  Гц. Значення відносної різниці  $\frac{f_0 - f_B}{f_0} \cdot 100 = 13\%$ . Таке

порівняно невелике розходження частот свідчить про те, що при  $d_e \rightarrow 0$  пружний зв'язок між протилежними ресорами з БПП і дзеркалом в пружній системі сканера майже не впливає на власну частоту системи в цілому. Чисельні значення нижчих власні частот в наведеному прикладі ( $\sim 400$  Гц) дозволяє розробити ефективну конструкцію двокоординатного сканера як для візуальної системи з відтворенням зображення на сітківці ока, так і для систем запису і відтворення інформації на лазерні диски. Отримана математична модель двокоординатного сканера дозволяє наближено визначити кути сканування і нижчу власну частоту пружної системи в залежності від геометричних і фізичних параметрів елементів системи, а також знайшли їх оптимальні значення (для досягнення максимуму кута сканування).

**Висновки.** Розроблено математичну модель двокоординатного п'єзоприводного сканера, що враховує взаємодію пружних елементів і дозволяє визначати кутові відхилення дзеркала та нижчу власну частоту системи. Аналітичний аналіз і чисельні розрахунки показали суттєвий вплив відносного діаметра пружного стержня  $d_e$  на амплітуду кутових відхилень. Максимальне

значення кута сканування спостерігається у діапазоні  $d_e = 0,05-0,1$ , що визначає оптимальні геометричні параметри для проектування сканера.

Встановлено, що жорстке з'єднання ресори з пружним стержнем забезпечує збільшення кута повороту дзеркала до 26 % порівняно із шарнірним варіантом, що підтверджує доцільність використання саме такої конструктивної схеми. Нижча власна частота пружної системи визначається переважно жорсткістю пружних стержнів і для досліджених параметрів становить близько 400-470 Гц, що відповідає вимогам до лазерних сканерів високої точності.

Запропонована модель може бути застосована для оптимізації конструкцій двокоординатних п'єзосканерів у системах лазерного запису, відтворення інформації та офтальмологічних приладів, де необхідне стабільне кутове позиціонування з високою частотною характеристикою.

#### Інформаційні джерела

1. Філяшкін М. К. Мікроелектромеханічні системи: навч. посібн. Київ: НАУ, 2019. 276 с.
2. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. Київ: НАУ, 2017. 528 с.
3. Лобур М., Мельник М. Основи мікросистемних пристроїв: навч. посіб. URL: <http://cad.lp.edu.ua/project/b3.pdf> (дата звернення 06.11.2025).
4. Теслюк В. М., Кривий Р. З., Мельник М. Р. Автоматизація проектування МЕМС з використанням системи COMSOL: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2016. 216 с.
5. Боровий М. О., Куницький Ю. А., Каленик О. О., Овсієнко І. В., Цареградська Т. Л. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої: навч. посіб. Київ: Інтерсервіс, 2015. 350 с.
6. Денисюк В. Ю. Методика розрахунку і проектування актюаторів дискретної дії. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2024. Вип. 25. С. 53-58. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-08>
7. Діденко Ю. В., Татарчук Д. Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 113 с.
8. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Методика проектування високоточних оптико-електронних приладів для безконтактного автоматичного вимірювання лінійних переміщень. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2023. Вип. 23. С. 22-28. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-04>
9. Денисюк В. Ю. Система автоматичного регулювання прецизійного переміщення сканера скануючого зондового мікроскопа. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2021. Вип. 19. С. 44-48. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-19-7>

**Pylypets M., Denysiuk V.**

Lutsk National Technical University

#### MODELING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO-COORDINATE PIEZO-ACTUATED SCANNERS

*The paper presents the results of mathematical modeling of the dynamic characteristics of a two-coordinate piezoelectric scanner designed for high-precision image reproduction in laser scanning and optical positioning systems. A generalized computational model is proposed that takes into account the interaction of elastic elements in two scanning planes and the spatial nature of deformations. Analytical dependencies are obtained for determining the angles of deflection of the mirror and the lowest natural frequency of the system, taking into account the geometric and physical-mechanical parameters of the structural elements. A numerical analysis of the influence of the relative diameter of the elastic rod on the amplitude of angular deviations and the natural frequency of the scanner is performed. It is shown that the maximum scanning angle is achieved at the optimal ratio of the diameter and length of the elastic rods. The developed model allows optimization of design parameters to increase the efficiency of two-axis piezoscanners and can be used in the creation of micromechanical manipulators and high-precision optical systems.*

**Keywords:** piezoactuator, two-axis scanner, bimorphic element, mathematical modeling, scanning angle, natural frequency, optimization.

Дата першого надходження  
статті до видання  
11.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
15.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 004.422

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-22

Сацик В. О., Маркіна Л. М., Копчунь А. О., Сацик О. В.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## АНАЛІЗ РОБОТИ ТА НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА НА БАЗІ ПРОШИВКИ BETAFLIGHT

*У статті здійснено аналіз теоретичних основ та практичних аспектів роботи PID-регулятора в системах стабілізації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) роторного типу, що функціонують на базі прошивки Betaflight. Розглянуто фундаментальні принципи побудови PID-регуляції, вплив пропорційної, інтегральної та диференціальної складових на керованість літального апарату, а також особливості взаємодії регулятора з динамічними характеристиками FPV-платформи. Особливу увагу приділено можливості налаштування параметрів PID-регулятора під час польоту, визначення тонкощів адаптації значень під різні типи БПЛА та аналізу чутливості системи до зміни цих параметрів. На основі проведеного експрес-аналізу ключових прошивок польотних контролерів для практичної частини вибрано відповідно Betaflight. Наведено огляд специфіки реалізації PID-контролю в Betaflight, включаючи систему компенсації зовнішніх перешкод та механізми оптимізації керованості апарату. Показано практичні підходи до налаштування PID-параметрів для досягнення їх підвищеної стабільності.*

*Отримані результати можуть бути використані для удосконалення алгоритмів управління FPV-дронами, оптимізації польотних характеристик та підвищення ефективності застосування Betaflight у наукових та практичних завданнях.*

**Ключові слова:** *PID-регулятор, Betaflight, стабілізація польоту, БПЛА, FPV-дрон, контролер польоту.*

**Постановка проблеми.** Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), особливо FPV-дрони, висувають підвищені вимоги до точності керування та стабільності польоту через високу швидкість та динамічність систем. Проблема полягає у тому, що некоректно налаштований контролер коптера призводить до ряду помилок в роботі комплексу: нестабільність польоту; проблеми з управлінням; затримки або неправильна реакція на команди пульта (неконтрольоване прискорення або гальмування; підвищений ризик аварій; перевантаження двигунів і акумулятора; значне зниження точності польоту (похибки при виконанні місій, наприклад, картографування або аерофотозйомки); помилки в роботі датчиків; виклик безпідставних аварійних режимів і т.д.

Варто відмітити, що коптери як і інші типи роботизованих комплексів мають широкий спектр налаштувань, від власне контролера до пультів управління які мають свої нюанси та особливості

**Метою дослідження** є визначення практичних підходів до налаштування PID-регулятора Betaflight та аналіз їх ефективності для FPV-платформ різної конфігурації.

### **Аналіз існуючих програмних рішень та наукових підходів.**

Налаштування польотного контролера здійснюється на основі різних типів прошивок. Прошивка польотного контролера – це програмне забезпечення, яке працює на польотному контролері та керує роботою FPV-дрона. Це впливає на характеристики та особливості польоту, а різні варіанти прошивки мають різні переваги та недоліки для різних стилів польоту та вподобань.

Так наприклад, Betaflight використовується для налаштувань FC гоночних дронів та FPV-коптерів. Особливості: швидка реакція на команди, тонке налаштування PID, підтримка різних режимів польоту (Angle, Horizon, Acro).

iNav використовується в основному для автономних, картографічних дронів, та польотів за GPS. Особливості: автопілот, маршрутизація, утримання висоти, телеметрія.

ArduPilot, застосовують для: різних типів БПЛА (коптери, літаки, гелікоптери, авто, судна). ArduPilot відомий своїми широкими функціями та можливостями налаштування, що робить його

хорошим вибором для досвідчених пілотів і розробників. Особливості: планування складних місій, робота з великою кількістю сенсорів, підтримка GPS, телеметрії, різних сенсорів.

Multiwii була однією з перших популярних прошивок польотних контролерів в спільноті саморобних дронів і була випущена в 2010 році. Особливості: дуже проста для старту на Arduino-платах; легка для експериментів та навчання, популярна серед новачків; в той же час менш оптимізована для високошвидкісних FPV-дронів та обмежена підтримка сучасних сенсорів та 32-бітних FC.

Cleanflight – це прошивка польотного контролера з відкритим вихідним кодом, розроблена Домініком Кліфтоном і спочатку заснована на Baseflight. Він був випущений у 2014 році та швидко став популярним у спільноті FPV-дронів.

Butterflight – це бренд Betaflight, який має на меті привернути увагу до ефективності польоту FPV-дронів і передових функцій. Станом на 2018 рік основні відмінності між Butterflight і Betaflight полягають у програмній фільтрації сигналу гіроскопа та підтримці АКК VTX Smart Audio. Однак у 2019 році розробка зупинилася.

OpenPilot : був однією з перших розробок прошивки FC з відкритим вихідним кодом для мультироторів і вплинув на значний прогрес у варіантах прошивки керування польотом.

LibrePilot: є брендом OpenPilot і зосереджений на дослідженнях і розробках для використання в багатьох різних програмах, включаючи робототехніку. Хоча він не такий популярний у спільноті міні-квадрокоптерів, як інші варіанти прошивки, він має надійну команду розробників і залишається відкритим кодом.

TauLabs: ще один бренд OpenPilot. Проект орієнтований на професіоналів, дослідників і студентів, пропонуючи платформу початкового рівня зі швидким і простим налаштуванням/конфігурацією для будь-якої групи, якій потрібні БПЛА для своїх досліджень.

Останній, але не менш важливий у цьому списку dRonin, який походить від OpenPilot, зосереджується в основному на FPV-гонках безпілотників. Майстер налаштування/конфігурації швидкий і простий у використанні [1]. Посилання для літератури: (<https://surl.li/bedkfv>).

Провівши експрес-аналіз ключових прошивок польотних контролерів, можна стверджувати, що вони дозволяють налаштувати широкий спектр параметрів – від базової стабілізації до складних автономних режимів. Незалежно від рівня складності чи спеціалізації, всі вони дозволяють:

- працювати з даними IMU (акселерометр + гіроскоп),
- компенсувати зовнішні збурення (вітер, прискорення, зміна тяги),
- стабілізувати апарат у просторі,
- керувати оборотами моторів,
- виконувати режими стабілізації та ручного керування,
- працювати з додатковими сенсорами (барометр, GPS, магнітометр).

Усі розглянуті вище системи – від найпростішої MultiWii до сучасного ArduPilot – у своїй основі використовують PID-регулятори, це говорить про архіважливість даного параметру, так як саме він виступає «серцем» стабілізації БПЛА.

З нашої точки зору, оптимальним вибором є Betaflight, оскільки вона забезпечує найточніше та найефективніше регулювання, в переважній більшості налаштувань і зокрема, дозволяє найтонше й найточніше налаштувати PID-регулятори для максимальної реактивності.

Таким чином, у подальшому зосередимося на практичних аспектах налаштування PID-регуляторів у прошивці Betaflight, оскільки саме вони визначають точність керування та стабільність польоту БПЛА.

**Виклад основного матеріалу.** ПІД-регулятор – це автоматичний регулятор з зворотнім зв'язком. Керуючий сигнал формується за законом пропорційно-інтегрально-дефініційного регулювання, тобто вплив представляє собою суму трьох складових різниць між вхідним сигналом і сигналом зворотнього зв'язку. Під регулятор використовується для коригування вихідного сигналу системи, щоб забезпечити бажану відповідь на вхідний сигнал.

Управління відбувається за допомогою закону пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання і підрегулювання, який включає три складові пропорційну, інтегральну і диференціальну (рисунок 1).

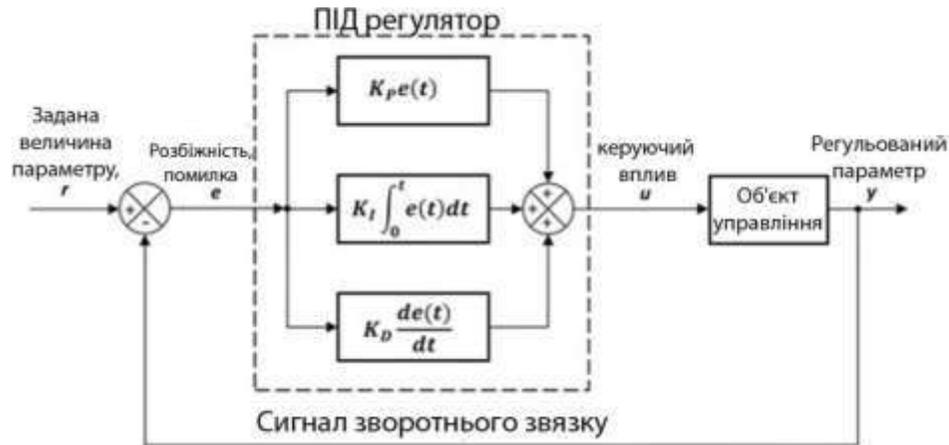


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування БПЛА

Пропорційна  $P$  складова, відповідає за величину та напрямок зміни вихідного сигналу відносно різниці між бажаним значенням вхідний сигнал і поточним значенням (сигналом зворотнього зв'язку). Це визначає ступінь корекції, яка потрібна для зведення різниці між входом і виходом до нуля.

Дана складова, визначає ступінь відповіді дрона на помилку між бажаною та фактичною позицією. Збільшення цього параметра може збільшити реакцію дрона на зміни, але занадто велике значення може призвести до коливань. Тобто  $P$ -складова відповідає за те, як швидко і різко буде реагувати на наші стіки дрон (так звана реактивність дрона) [2].

Інтегральна  $I$  складова, реагує на накопичену величину помилки в часі. Це означає, що вона виправляє систему, коли помилка тривалий час зводиться до нуля. Інтегральна складова допомагає усунути будь-які залишкові помилки і встановлює точність системи. Крім того, Інтегральна  $I$ -складова відповідає за корекцію системних помилок, таких як невеликі похибки у триманні позиції дрона. Збільшення цього параметра може допомогти усунути залишкові похибки. Наприклад, коли наш коптер постійно десь клонить,  $I$ -складова допомагає прибрати цей нюанс.

Диференційна  $D$  складова, відповідає за швидкі зміни вихідному сигналу. Вона допомагає уникнути перерегулювання системи на швидкі зміни вхідного сигналу, зменшуючи величину корекції, в залежності від того, настільки швидко відбувається зміна. Коли ці всі складові об'єднуються в системі підрегулювання, вони дозволяють системі швидко та точно реагувати на зміни вхідного сигналу і підтримувати систему у стабільному стані.

В той же час, Диференційна  $D$ -складова зменшує реакцію дрона на швидкі зміни відомих похибок. Це може допомогти уникнути коливань під час різких змін напрямку чи швидкості. То параметр  $D$  виступає тут як певний демпфер, звідси власне й назва даної складової [2].

*PID-тюнінг* включає в себе експерименти із значеннями цих параметрів, спостереження за реакцією дрона на різні команди та зміну параметрів для досягнення оптимальної стабільності і реактивності (здатність бортової системи польотного контролера забезпечувати оперативну та точну реакцію апарата на введені команди, що проявляється у швидкій та передбачуваній зміні кутів крену, тангажу та курсу) під час польоту. Це може бути важливим для отримання якісного відео та контролю. Тобто, перш ніж займатися налаштуванням  $PID$ -ів, ми повинні мати чітку ціль наших налаштувань [4].

В разі виникнення ситуації, коли вмикається функція ARM (увімкнення двигунів), а наш коптер не летить, або починає рухатися сам, вібрувати, ця проблема пов'язана, скоріше за все, не з  $PID$ -ами. Це пов'язано безпосередньо з їх збіркою, або з налаштуванням фільтрації на дронах.

(питання фільтрації необхідно розглядати окремо). Тобто, перед налаштуванням PID-ів, коптер повинен вже літати, хоч якось.

Всі параметри підбираються експериментально. Завантажувати пресети (готові конфігурації PID, фільтрів, RPM-фільтрації, рейтів, ESC-настроек та інших параметрів) варто. Підбір відповідних коефіцієнтів необхідно проводити вручну, дивитися на графіки та реальні вібрації коптра, так як пресети дають нам якесь готове рішення, яке може не підійти, що призведе до перегріву квадрокоптера і виведення його з ладу.

Метою налаштування PID є оптимізація роботи системи стабілізації, яка проявляється у високій реактивності, відсутності осциляцій, відсутності перерегулюванні, утримання орієнтації без дрейфу; компенсації зовнішніх збурень (пориви вітру), максимально точній повторюваності траєкторії заданої пілотом [3].

З метою дослідження впливу налаштувань PID-регулятора на поведінку безпілотного літального апарату в умовах реального польоту було проведено серію експериментів із варіюванням параметрів пропорційної (P), інтегральної (I) та диференціальної (D) складових.

Всі дослідження проводилися на базі коптера:

1. Розмір рами: 7 дюймів;
2. Тип двигунів: безколекторні 2306;
3. Пропелери: 3-лопатеві (тип 3-blade);
4. Загальна вага: 1398 г (492 г – вага дрона без батареї, 906 г – батарея);
5. Прошивка польотного контролера: Betaflight;
6. Стиль польоту: Асго.

Експерименти супроводжувалися збором даних за допомогою системи Blackbox у середовищі Betaflight, що дозволило отримати об'єктивні графічні характеристики реакції дрона на задані команди. Кожна конфігурація PID-параметрів аналізувалася окремо для визначення її впливу на стабільність, чутливість та наявність осциляцій у польоті (рис. 2-9).

Експеримент 1. (Базовий варіант)

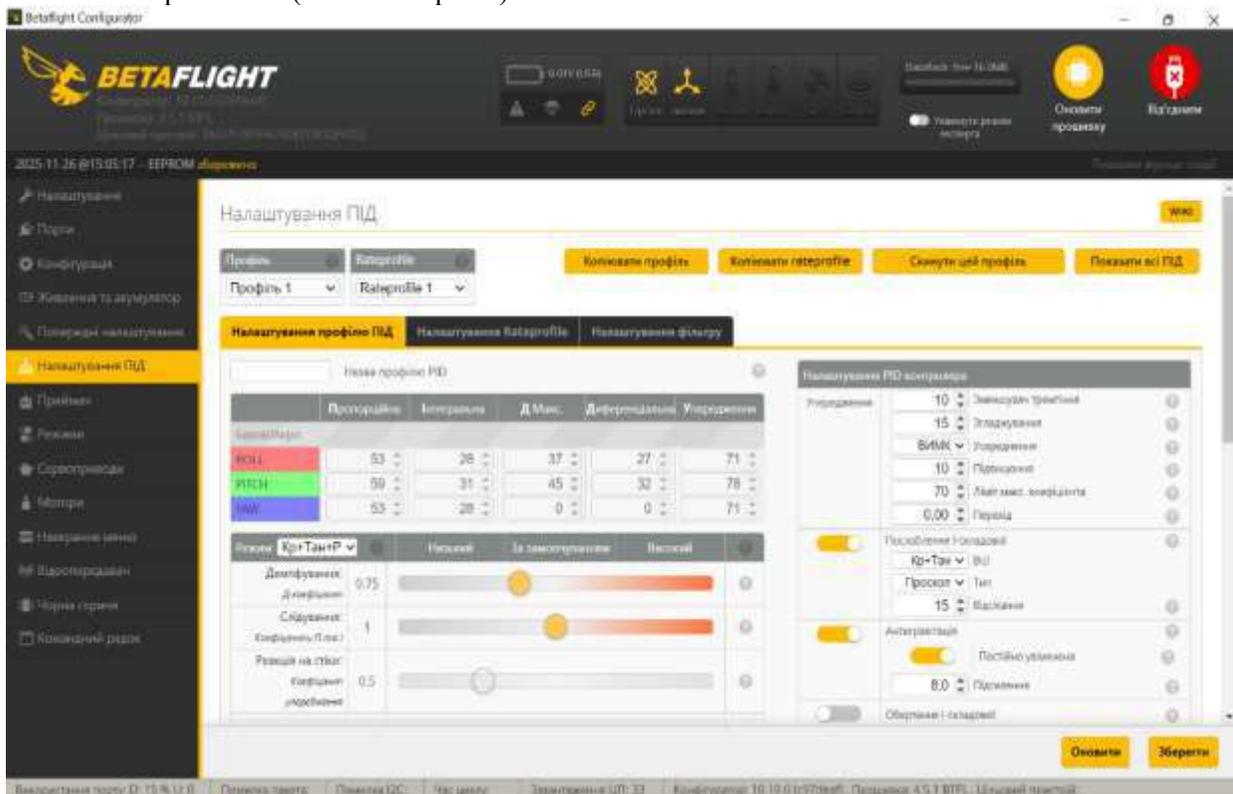


Рисунок 2 – Налаштування коефіцієнтів PID-регулятора експерименту 1

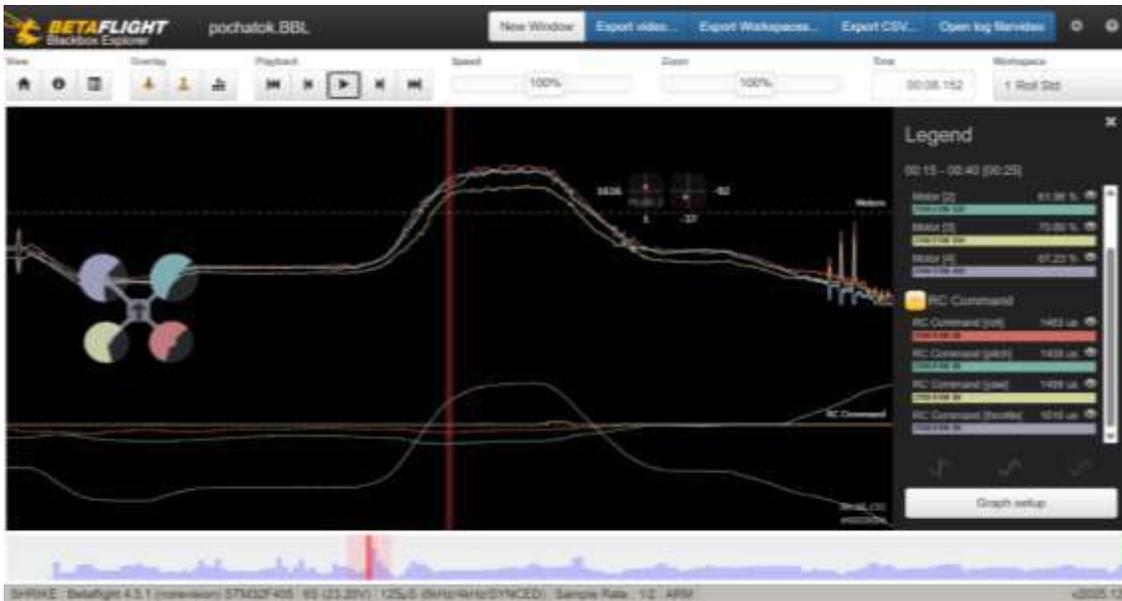


Рисунок 3 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПД конфігурації експерименту 1

Система демонструє найкращу якість роботи: реакція передбачувана, без осциляцій чи перерегулювання. Рух стабільний і контрольований, відгук на команди точний і згладжений.

Експеримент 2. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 66, 64 та 66 відсотків. Зниження I складової - по всіх осях на 32 відсотки. Зниження D складової на 11, 3 та 0 відсотків відповідно.



Рисунок 4 – Налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора експерименту 2

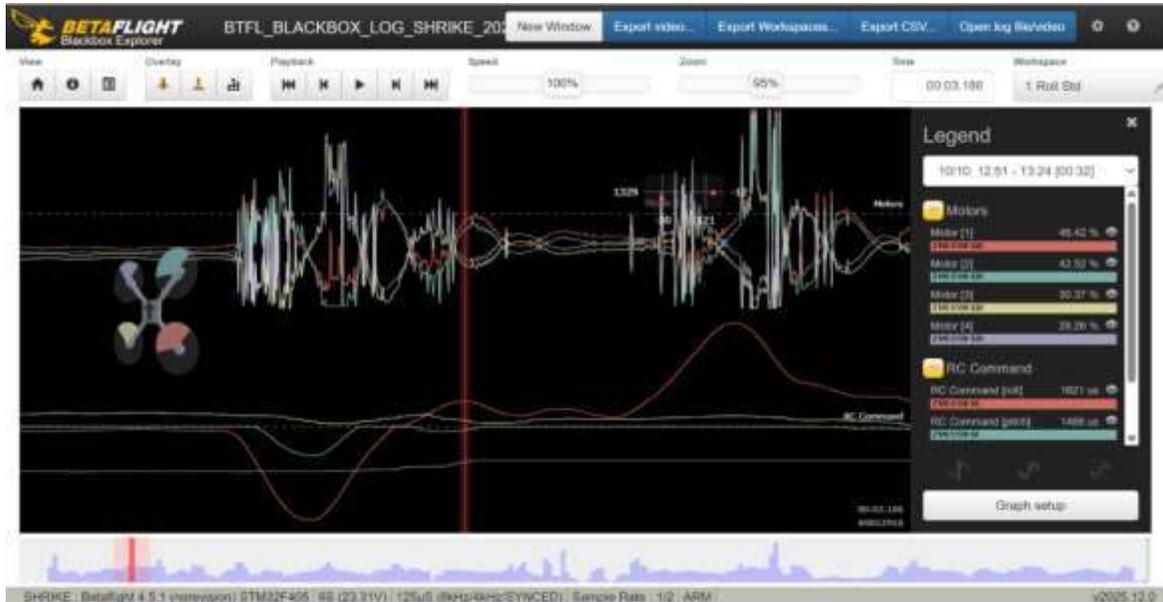


Рисунок 5 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 2

Помірно стабільна реакція з легкими осциляціями. Налаштування працюють задовільно, проте в окремих режимах спостерігаються легкі осциляції. Стан придатний до польотів, але не ідеальний.

Експеримент 3. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 71 та 75 відсотків. Підвищення I складової - по осях ROLL, PITCH та YAW – на 357, 339 та 357 відсотків. Зниження D складової на 18, 38 та 0 відсотків відповідно.



Рисунок 6 – Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора експерименту 3



Рисунок 7 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 3

Перерегулювання, як можна бачити з рисунка 7, досить чітко виражене. Реакція дрона стає різкішою, графік містить коливання середньої інтенсивності, що свідчить про нестачу демпфування. Необхідна корекція PID-параметрів для покращення стабільності системи.

Експеримент 4. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 56 та 75 відсотків. Зниження I складової - по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 58 та 75 відсотків. Зниження D складової на 0, 47 та 0 відсотків відповідно.

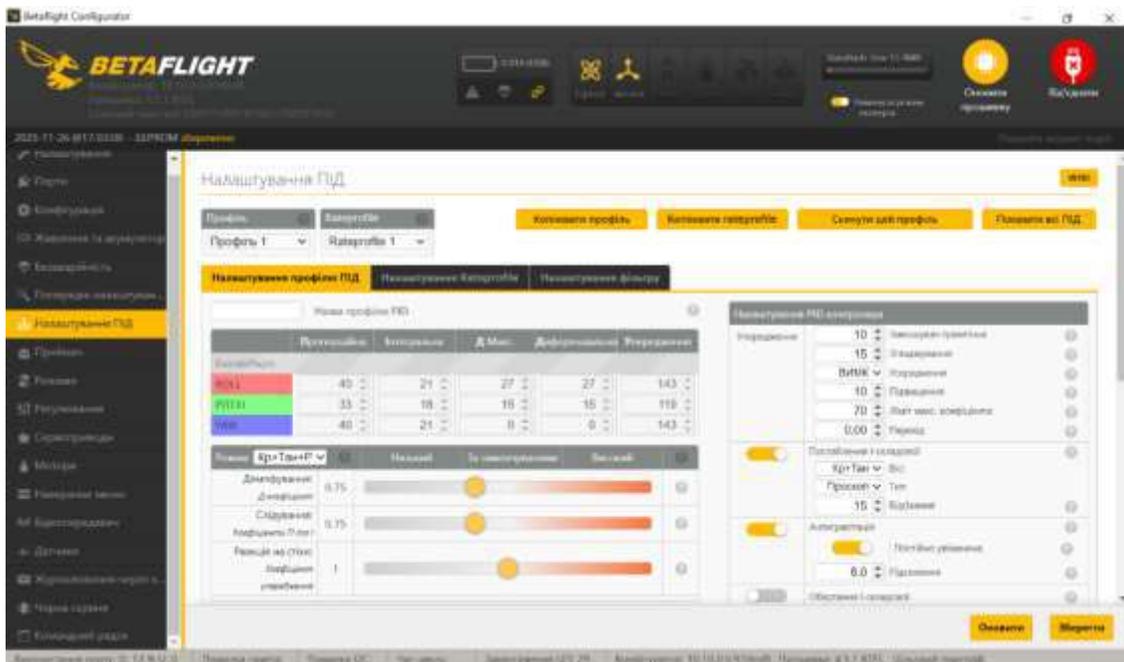


Рисунок 8 – Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора експерименту 4



Рисунок 9 – Реакції двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 4

Як видно з рисунка 9, система демонструє нестабільну поведінку через надмірно низькі або незбалансовані PID-параметри. Реакція двигунів хаотична, графік містить значну строкатість і осциляції. Така конфігурація непридатна для стабільного польоту та потребує суттєвого перегляду PID-налаштувань.

**Висновок.** Проведена серія експериментів із PID-регулятором дала змогу емпірично дослідити вплив окремих параметрів на політну стабільність та реактивність безпілотного літального апарату. Незважаючи на часткову нестабільність окремих конфігурацій, було виявлено оптимальне поєднання налаштувань, яке може слугувати базою для подальших точних корекцій.

Зібрані дані дозволяють надалі скоротити кількість ітерацій у процесі налаштування, зменшити ймовірність осциляцій та підвищити ефективність системи стабілізації. Найбільш збалансовані показники стабільності та керованості були зафіксовані у варіанті 0, для якого застосовано такі PID-параметри: Roll – P = 53, I = 28, D = 27; Pitch – P = 59, I = 31, D = 32; Yaw – P = 53, I = 28, D = 0. Ця конфігурація забезпечила чітке слідування RC-командам, відсутність осциляцій та плавне гасіння інерції після маневрів. Саме вона може розглядатись як еталонна для подальших експериментів і практичного застосування у FPV-польотах.

Загалом, представлені налаштування PID-регулятора забезпечують оптимальний баланс між стабільністю та реактивністю FPV-дрона, що дозволяє досягти високої точності керування під час Асго-польоту та знижує ризик перегріву моторів. Дані результати є практичною демонстрацією можливостей налаштування PID в середовищі Betaflight та підтверджують ефективність ручного тюнінгу під конкретну конфігурацію платформи.

#### Інформаційні джерела

1. Victory Drones. URL: <https://fpv-manuals.victory-drones.com/> (дата звернення 03.11.2025)
2. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи : навч. посіб. / Б. І. Приймак. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 310 с.
3. OscarLiang URL: <https://oscarliang.com/pid/#Remember-Not-Every-Problem-is-PID-Related> (дата звернення 15.10.2025)
4. Посібник з налаштування PID для багатокотерів URL: [https://docs.px4.io/main/uk/config\\_mc/pid\\_tuning\\_guide\\_multicopter](https://docs.px4.io/main/uk/config_mc/pid_tuning_guide_multicopter) (дата звернення 20.11.2025)

**Satsyk V., Markina L., Kopchun A., Satsyk O.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

### **ANALYSIS OF THE OPERATION AND CONFIGURATION OF THE PID CONTROLLER IN UAV STABILIZATION SYSTEMS BASED ON BETAFLIGHT FIRMWARE**

*The article analyzes the theoretical foundations and practical aspects of the operation of a PID controller in stabilization systems for rotary-wing and fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) operating on the basis of Betaflight firmware. The fundamental principles of PID control design, the influence of proportional, integral, and derivative components on aircraft controllability, as well as the peculiarities of the controller's interaction with the dynamic characteristics of the FPV platform are considered. Particular attention is paid to the possibility of adjusting the parameters of the PID controller during flight, determining the subtleties of adapting values for different types of UAVs, and analyzing the sensitivity of the system to changes in these parameters. An overview of the specifics of PID control implementation in Betaflight is provided, including the capabilities of high-frequency filters, the external interference compensation system, and mechanisms for optimizing aircraft controllability. Practical approaches to adjusting PID parameters to achieve increased stability and control accuracy in both rotary UAVs and fixed-wing models are shown. The results obtained can be used to improve FPV drone control algorithms, optimize flight characteristics, and increase the effectiveness of Betaflight in scientific and practical applications.*

**Keywords:** *PID controller, Betaflight, flight stabilization, UAV, FPV drone, flight controller.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
12.11.2025 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
15.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 004.932.2:004.896:004.451.28:004.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-23

Смолянкін О. О., Маркіна Л. М.

Луцький національний технічний університет

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ RASPBERRY PI З ВИКОРИСТАННЯМ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА NODE-RED

У статті представлено комплексний підхід до побудови інтелектуальної системи розпізнавання об'єктів на базі компактного обчислювального модуля Raspberry Pi, сучасних алгоритмів глибокого навчання та візуальної IoT-платформи Node-RED. Сформовано архітектуру апаратно-програмного комплексу, виконано аналіз методів попередньої обробки зображень, оптимізації нейронних моделей під обмежені апаратні ресурси та організації потокової обробки відео. Особливу увагу приділено інтеграції з Node-RED для реалізації візуальної аналітики, віддаленого моніторингу та керування. Проведено експериментальні дослідження працездатності системи за різних умов освітлення та навантаження. Отримані результати демонструють можливість побудови високоточної та енергоефективної системи комп'ютерного зору без використання потужних GPU-серверів.

**Ключові слова:** Raspberry Pi, комп'ютерний зір, YOLO, CNN, Node-RED, глибоке навчання, IoT, штучний інтелект, відеодетекція.

**Проблема дослідження.** Більшість сучасних систем розпізнавання об'єктів базується на використанні потужних графічних процесорів, здатних обробляти значний обсяг даних у реальному часі. Однак у багатьох сферах — промисловій автоматизації, робототехніці, системах відеоспостереження, "розумних" пристроях — використання габаритних і дорогих GPU є недоцільним або неможливим. Проблема полягає у тому, щоб забезпечити високу точність, швидкість і стабільність розпізнавання на малопотужних пристроях, таких як Raspberry Pi.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка систем розпізнавання об'єктів на базі вбудованих платформ останніми роками є одним із найдинамічніших напрямів у галузі комп'ютерного зору та Інтернету речей. У численних дослідженнях продемонстровано перехід від класичних алгоритмів машинного навчання до глибоких нейронних мереж, здатних автоматично виділяти ознаки зображень та працювати у складних умовах. Зокрема, у роботі Jain та Shah [1] показано ефективність застосування згорткових нейронних мереж для реального часу на Raspberry Pi із використанням MobileNet та Tiny-YOLO. Подібні результати наведено у праці Antoshchuk [2], де проаналізовано методи підвищення продуктивності системи детекції на одноплатних комп'ютерах.

Окремий масив публікацій присвячено використанню Raspberry Pi для відеоспостереження, автоматизації та локальної відеоаналітики. Дослідження Лавренюка, Кравчука та Соколовського [3] демонструє можливість створення повноцінної системи комп'ютерного зору на Raspberry Pi з використанням OpenCV та оптимізованих моделей. Автори підкреслюють, що продуктивність значною мірою залежить від налаштування відеопотоку, роздільної здатності та температурної стабільності пристрою.

У сучасних роботах значну увагу приділено оптимізації нейронних моделей для малопотужних платформ. Зокрема, у дослідженнях, присвячених легковаговим архітектурам YOLO, SSD та MobileNet, показано ефективність квантизації, прунінгу та використання TensorFlow Lite [1], [2], [4]. Пінчук і Черненко [4] наголошують, що завдяки оптимізації можна забезпечити прийнятну швидкодію навіть без спеціалізованих GPU.

Паралельно активно розвивається напрям інтеграції систем комп'ютерного зору в IoT-інфраструктуру. Node-RED вважається одним із найбільш універсальних інструментів для маршрутизації даних, побудови сценаріїв реагування та візуалізації результатів у режимі реального часу. Це підтверджено у роботах Onwuegbuzie та співавторів [3], а також Lin, Chang і Wu [5], де Node-RED використовується для створення систем моніторингу, контролю та збору телеметрії. Дослідники підкреслюють простоту інтеграції Node-RED із MQTT, Modbus, веб-API та базами даних.

Особливе місце серед таких робіт займає публікація Смолянкіна, Маркіної, Решетила та Сацика [6], у якій розглянуто застосування Node-RED саме на Raspberry Pi для побудови систем керування. Автори доводять, що Node-RED може виконувати функції спрощеної SCADA-системи,

забезпечуючи наочну взаємодію з обладнанням, легко масштабовані потоки даних і доступність для інженерів без глибокого програмного досвіду. Схожі висновки подають Караван і Дяченко [7], наголошуючи на доцільності використання Node-RED у навчальних, лабораторних та малобюджетних IoT-проєктах.

Загальний аналіз наукових джерел показує, що більшість існуючих рішень розглядають або задачу розпізнавання об'єктів на Raspberry Pi, або окремо задачу організації IoT-моніторингу в Node-RED. Комплексні дослідження, де обидві технології інтегруються у єдиний апаратно-програмний інтелектуальний комплекс, зустрічаються значно рідше [5], [6], [8]. Саме тому поєднання глибинних моделей комп'ютерного зору на Raspberry Pi із потоковою аналітикою, візуалізацією й керуванням у Node-RED є науково актуальним та перспективним напрямом розвитку.

**Мета статті.** Метою є розробити та дослідити інтелектуальну систему детекції об'єктів, що працює на Raspberry Pi із застосуванням глибоких нейронних мереж і інтеграції з Node-RED, що дозволяє реалізувати візуальний контроль, аналітику та керування в IoT-середовищі.

**Об'єкт дослідження.** Процеси та алгоритми розпізнавання об'єктів у відеопотоці.

**Предмет дослідження.** Глибинні нейронні мережі, методи попередньої обробки зображень, оптимізація моделей для малопотужних пристроїв та механізми IoT-інтеграції на базі Node-RED.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні системи комп'ютерного зору широко застосовуються в промисловій автоматизації, транспорті, аграрному секторі, робототехніці, системах безпеки та «розумних» пристроях. Переважна більшість високоточних систем детекції об'єктів працює на спеціалізованих графічних прискорювачах (GPU), що забезпечують високу швидкість обробки даних. Проте використання громіздких і дорогих GPU не завжди виправдане або можливе, особливо в IoT-платформах та автономних мобільних пристроях.

Одним із перспективних рішень є поєднання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi із сучасними алгоритмами глибокого навчання. Це дозволяє організувати розпізнавання об'єктів у реальному часі навіть на малопотужних системах, забезпечивши автономність і низьке енергоспоживання.

Додаткові можливості інтеграції кінцевих пристроїв у інфраструктуру IoT відкриває середовище Node-RED, що надає зручні інструменти для збору, обробки, маршрутизації та візуалізації даних. Ефективність Node-RED на Raspberry Pi підтверджено у роботі [6], де наведено переваги такого підходу для промислових контролерів та систем моніторингу.

Важливим етапом, що передує розпізнаванню, є попередня обробка зображення. Вона потрібна для того, щоб вирівняти контраст, зменшити шум, виділити межі об'єктів і підготувати дані до аналізу. Правильна попередня обробка суттєво знижує навантаження на нейронну мережу, підвищує точність класифікації та залишає лише найважливіші ознаки сцени. На практиці використовують методи фільтрації, згладжування, нормалізації яскравості, виділення контурів, порогової сегментації та інші інструменти. Особливо ефективними є фільтри, що згладжують однорідні ділянки, але водночас зберігають різкі переходи — саме вони забезпечують мережі чіткі лінії для аналізу.

Ще однією важливою частиною теорії розпізнавання є виділення ознак. Традиційно для цього застосовували методи ручного проєктування ознак — SIFT, SURF, HOG та інші. Вони дозволяли вирізняти характерні точки чи напрямки на зображенні та використовувалися в класичних алгоритмах машинного навчання. Проте такі методи мали ряд обмежень: складність налаштування, низьку універсальність, залежність від умов зйомки. Тому з розвитком глибокого навчання відповідальність за виділення ознак перейшла до нейронних мереж. Завдяки цьому система сама визначає, які фрагменти зображення є ключовими для класифікації.

Найбільш революційним кроком стало застосування згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні автоматично знаходити локальні структури, характерні для певного класу об'єктів. CNN дозволяють значно скоротити кількість параметрів, адже один і той самий фільтр проходить по різних частинах зображення. Таким чином мережа «вчиться» розпізнавати текстури, краї, кути та складніші форми незалежно від їхнього місця розташування в кадрі.

Однак навіть найсучасніші алгоритми матимуть недостатню ефективність без правильних узгоджених дій між усіма етапами обробки. У практичних системах комп'ютерного зору важливу роль відіграє не тільки нейронна мережа, але й загальна логіка обробки відеопотоку. Наприклад, використання динамічної інформації, тобто аналіз різниці між кадрами, дає змогу зменшити кількість помилкових детекцій і фокусуватися на об'єктах, які рухаються. Це також дозволяє

знизити обсяг обчислень: якщо фон статичний, то система може обробляти лише області, де відбулися зміни.

Ще один аспект теоретичної бази — інваріантність алгоритмів до змін масштабу, повороту та освітлення. Хороша модель повинна однаково впізнавати об'єкт незалежно від того, великий він чи малий, освітлений природним чи штучним світлом, частково перекритий або знятий зі складного ракурсу. Для цього використовуються спеціальні архітектурні рішення, техніки аугментації даних, а також багаторівневий аналіз ознак.

У цілому теоретичні основи задачі розпізнавання об'єктів включають комплекс математичних, алгоритмічних і технічних підходів, кожен з яких спрямований на вирішення конкретних проблем аналізу складних візуальних сцен. Глибоке розуміння цих принципів є основою для створення ефективних прикладних систем, здатних працювати в реальному часі та забезпечувати високу точність на платформі з обмеженими ресурсами, такої як Raspberry Pi [1, 3].

Системи розпізнавання об'єктів сьогодні базуються насамперед на моделях глибокого навчання, які здатні автоматично витягати інформацію зі зображень без ручного визначення ознак. Еволюція цих алгоритмів пройшла довгий шлях — від перших експериментальних моделей до сучасних архітектур, які здатні працювати в реальному часі на простих одноплатних комп'ютерах.

Початкові моделі комп'ютерного зору спиралися на класичні алгоритми машинного навчання: метод опорних векторів, дерева рішень, логістичну регресію. Проте їхня ефективність суттєво обмежувалася необхідністю вручну визначати ознаки, а також чутливістю до змін умов освітлення, масштабу та орієнтації об'єкта. Наприклад, для виявлення автомобіля потрібно було заздалегідь описати типові характеристики — круглі колеса, прямокутна форма кузова, світлі області фар. Зміна ракурсу чи тіні одразу руйнувала стабільність класифікації.

Ситуація кардинально змінилася з появою згорткових нейронних мереж. CNN виявилися універсальними для обробки зображень завдяки тому, що вони вивчають ознаки різного рівня складності самостійно. На перших шарах мережа розпізнає прості структури — краї, лінії, кути; на середніх — текстури та фрагменти форм; на глибинних — цілі об'єкти.

Із розвитком мереж з'явилися нові архітектури, спрямовані на конкретні задачі комп'ютерного зору. Для класифікації були створені моделі AlexNet, VGG, Inception, ResNet. Для сегментації — U-Net, Mask R-CNN. А для задачі детекції — YOLO, SSD, Faster R-CNN, RetinaNet. Кожна з них має власні переваги, пов'язані зі швидкістю, точністю, стійкістю до шумів або універсальністю.

Ключовим проривом у задачі розпізнавання стало створення моделей, здатних визначати одразу два аспекти: клас об'єкта та його точні координати у кадрі. Двоетапні моделі (серія R-CNN) досягають високої точності за рахунок складної обробки, а одноетапні (YOLO, SSD) здатні працювати майже миттєво.

Разом із тим, у сучасних системах дедалі частіше застосовують квантизацію моделей, тобто перетворення ваг нейронної мережі у формат з меншою розрядністю (наприклад, INT8). TensorFlow Lite, який широко використовується на Raspberry Pi, дозволяє запускати моделі зі зменшеними розмірами, що значно прискорює роботу без помітної втрати якості.

Підсумовуючи, сучасні нейронні мережі забезпечують не лише точне розпізнавання об'єктів, а й можливість їхньої оптимізації до рівня, що дозволяє застосовувати їх у невеликих пристроях із мінімальним енергоспоживанням.

Реалізація системи розпізнавання об'єктів потребує не лише ефективної моделі, але й правильно підібраної апаратної основи. Традиційно для глибокого навчання використовуються потужні графічні процесори. Проте вбудовані системи потребують компактності, автономності та енергоефективності. Це й робить одноплатні комп'ютери ключовою платформою для застосувань у відеоспостереженні, робототехніці, аграрних системах, «розумному» транспорті та промисловій автоматизації.

Однією з ключових переваг системи є інтеграція з Node-RED — середовищем візуального програмування, яке дозволяє організувати обробку та маршрутизацію даних без складного програмування. Node-RED виступає центральною ланкою IoT-екосистеми та дозволяє реалізувати візуальний моніторинг, оповіщення, автоматичні реакції на події та підключення до будь-яких зовнішніх API чи баз даних [7]. Node-RED давно зарекомендував себе як зручний інструмент для побудови систем керування на базі Raspberry Pi, що детально висвітлено у статті [3], де доведено ефективність Node-RED для організації керування промисловими контролерами та IoT-системами.

У пропонованій системі Node-RED використовується для приймання даних від нейронної мережі через MQTT, HTTP або WebSocket. У вузлах Node-RED виконується обробка інформації про

виявлені об'єкти: їхній клас, координати, достовірність та час. Ця інформація може відображатись на Dashboard у вигляді таблиць, графіків, журналів подій, гістограм або інтерактивних індикаторів. Node-RED також дозволяє реалізувати бізнес-логіку реагування: надсилання повідомлень у Telegram, запис кадрів у базу даних, включення виконавчих пристроїв, активацію сигналізації та інші сценарії. У системах охорони та безпеки Node-RED забезпечує швидке реагування, а в робототехніці — динамічне керування рухомим обладнанням. Актуальність Node-RED підтверджується його широким застосуванням у промисловості, де потрібні наочність, гнучкість та простота конфігурації потоків даних.

Експериментальні дослідження показали, що Raspberry Pi здатен забезпечити стабільну роботу детектора в реальному часі зі швидкістю 7–10 FPS залежно від умов, освітлення та складності сцени. У темний час доби точність дещо знижується, однак за рахунок високої світлочутливості камери та адаптивних методів обробки зображення система зберігає стабільність роботи. Node-RED забезпечив надійний збір, візуалізацію та маршрутизацію даних, не створюючи додаткового значного навантаження на Raspberry Pi.

Таким чином, застосування Raspberry Pi у поєднанні з оптимізованими моделями глибокого навчання та інтеграцією з Node-RED дозволяє створити ефективну, доступну та автономну систему розпізнавання об'єктів. Поєднання цих технологій відкриває широкі можливості для застосування у системах відеоспостереження, промислової автоматизації, робототехніці, аграрних технологіях, безпеці та побутових IoT-рішеннях. Досвід використання Node-RED у системах керування Raspberry Pi, описаний у публікації Смолянкіна О.О. та співавторів (2023), підтверджує доцільність і ефективність такого підходу, забезпечуючи високу гнучкість та масштабованість системи.

Важливою частиною практичної реалізації є налаштування обробки відеопотоку. Щоб система працювала плавно, застосовують:

- зменшення роздільної здатності (наприклад, 640×360);
- квантизацію моделей (INT8);
- кешування попередніх кадрів;
- обмеження кількості об'єктів для відображення.

Заключним етапом є інтеграція системи — наприклад:

- у робототехнічну платформу;
- у систему відеоспостереження;
- у безпековий комплекс;
- в лінію автоматизації виробництва.

Реалізація на Raspberry Pi дозволяє створити недорогу, але функціональну систему, що працює повністю автономно й не потребує зовнішнього сервера.

**Висновки.** У проведеній роботі досліджено можливості створення інтелектуальної системи розпізнавання об'єктів на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, оптимізованих моделей глибокого навчання та середовища візуального програмування Node-RED. Показано, що навіть за відсутності високопродуктивних графічних прискорювачів сучасні згорткові нейронні мережі, зокрема моделі сімейства YOLO та MobileNet-SSD, здатні забезпечити високу точність та прийнятну швидкодію за ресурсних обмежень компактних апаратних платформ.

Експериментальні дослідження підтвердили, що Raspberry Pi 4 у поєднанні з камерою Camera Module 3 та оптимізованими моделями TensorFlow Lite може забезпечувати швидкість обробки до 7–10 кадрів за секунду в режимі реального часу. Окрім цього, використання методів попередньої обробки зображень, квантизації моделей та зменшення роздільної здатності дозволяє додатково підвищити стабільність і зменшити навантаження на систему.

Одним із ключових результатів роботи стало впровадження Node-RED як універсального інструмента для збору, маршрутизації та візуалізації даних. Node-RED значно розширив функціональні можливості системи, забезпечивши інтеграцію з IoT-сервісами, створення інформаційної панелі моніторингу, організацію реактивних сценаріїв та можливість підключення до зовнішніх API й баз даних. Такий підхід дозволив перетворити систему детекції об'єктів на повноцінний елемент інтелектуальної інфраструктури, придатний для застосування у промисловій автоматизації, безпеці, транспорті та побутових рішеннях.

Отримані результати підтверджують доцільність використання Raspberry Pi як основи для компактних і автономних систем комп'ютерного зору. Платформа забезпечує достатній рівень продуктивності, широкі можливості щодо розширення та інтеграції, а також низьку вартість у порівнянні з традиційними GPU-рішеннями. Водночас застосування Node-RED, ефективність якого

доведена раніше у роботі Смолянкіна О.О. та співавторів (2023), робить систему гнучкою, масштабованою та зручною в користуванні.

Таким чином, розроблений підхід демонструє перспективність використання глибоких нейронних мереж у поєднанні з Raspberry Pi та Node-RED для створення сучасних інтелектуальних IoT-рішень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на підвищення точності моделей, використання апаратного прискорення (Coral TPU, NPU), розширення можливостей інтеграції та застосування системи у більш складних реальних сценаріях.

#### Інформаційні джерела

1. Jain M., Shah A. Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection with Raspberry Pi // *International Journal of Computer Applications*. 2021. Vol. 182(45). P. 12-20.
2. Antoshchuk D. Research of Methods to Increase the Efficiency of the Object Detection System on the Raspberry Pi Platform // *Proceedings of ICAIT 2023*. 2023. P. 55-60.
3. Лавренюк М. О., Кравчук В. Г., Соколовський Д. О. Система відеоспостереження на базі Raspberry Pi з елементами комп'ютерного зору // *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. №5. С. 112-118.
4. Пінчук О. М., Черненко І. В. Інтелектуальні системи на основі глибокого навчання для розпізнавання об'єктів у відеопотоці // *IEEE UKRCON 2021*. 2021. P. 305-310.
5. Onwuegbuzie I.U., Ekong E., Udonkang E., Etuk U. Node-RED and IoT Analytics: A Real-Time Data Processing and Visualization Platform // *Zenodo*. 2024. DOI: [10.5281/zenodo.13856860](https://doi.org/10.5281/zenodo.13856860).
6. Смолянкін О. О., Маркіна Л. М., Решетило О. М., Сацик В. О. Аналіз системи керування на базі системи програмування Node-RED для контролерів Raspberry Pi // *Перспективні технології та прилади*. 2023. Вип. 22. С. 45-52. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-19>
7. Караван С. Г., Дяченко А. В. Застосування Node-RED для побудови IoT-систем моніторингу і керування // *Наукові праці Одеського національного політехнічного університету*. 2023. №3(67). С. 74-82.
8. Lin M.-H., Chang C.-L., Wu T.-Y. Node-RED Web-based Monitor and Control of Power System Using Modbus and MQTT Communication in Raspberry Pi Embedded Platform // *Sensors and Materials*. 2024. Vol. 36(5). P. 1643-1655.

**Smoliankin O., Markina L.**

Lutsk National Technical University

#### INTELLIGENT OBJECT RECOGNITION SYSTEM BASED ON RASPBERRY PI USING DEEP NEURAL NETWORKS AND NODE-RED

The article presents a comprehensive approach to the development of an intelligent object recognition system based on the compact Raspberry Pi computing module, modern deep learning algorithms, and the visual IoT platform Node-RED. The architecture of the hardware–software complex is designed, and an analysis of image preprocessing methods, optimization of neural network models for resource-constrained platforms, and real-time video stream processing is performed. Special attention is paid to the integration with Node-RED for implementing visual analytics, remote monitoring, and control. Experimental studies of system performance under various lighting conditions and workloads have been conducted. The obtained results demonstrate the possibility of building a high-accuracy and energy-efficient computer vision system without the need for powerful GPU servers.

**Keywords:** Raspberry Pi, computer vision, YOLO, CNN, Node-RED, deep learning, IoT, artificial intelligence, video detection.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
16.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
18.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 621.382.3:534.1:621.396.96

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-24

<sup>1</sup>Татарчук Д. Д., <sup>1</sup>Богдан О. В., <sup>1</sup>Діденко Ю. В., <sup>1</sup>Лупина Б. І., <sup>2</sup>Жеребець О. М.<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна<sup>2</sup> Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна

## МІКРОМЕХАНІЧНИЙ КАЛОРИМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР КОЛИВАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЧАСТИНОК ГАЗУ ДЛЯ ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА БПЛА

У статті розглянуто проблему виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за допомогою пасивних методів, зокрема акустичних. Проаналізовано сучасні технології детекції БПЛА, наведено їхні переваги та обмеження. Обґрунтовано доцільність застосування інфразвукових сенсорів для створення пасивних акустичних пеленгаторів, що дають змогу виявляти об'єкти без активного випромінювання. Описано принцип роботи мікромеханічного калориметричного сенсора коливальної швидкості частинок газу, побудованого на основі теплового потоку, який забезпечує високу чутливість у широкому діапазоні частот. Показано, що такий тип сенсорів, виготовлених за МЕМС-технологією, дає змогу визначати вектор акустичної швидкості в просторі, що є основою для точної пеленгації джерела інфразвукового та низькочастотного акустичного діапазону випромінювання. Зазначено, що чутливість сенсорів Microflowm узгоджується зі спектральними характеристиками шумів як електричних, так і реактивних двигунів БПЛА. Проведений аналіз підтверджує перспективність використання мікромеханічних теплових сенсорів у системах пасивного акустичного виявлення та ідентифікації безпілотних апаратів.

**Ключові слова:** БПЛА, сенсор коливальної швидкості частинок газу, акустична пеленгація, шумовий спектр, Microflowm.

**Постановка проблеми.** Останнім часом у різних сферах життєдіяльності людини все активніше використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА). Найбільш інтенсивно їх застосовують у [1–3]:

1. Військовій сфері (розвідка, коригування вогню, радіоелектронна боротьба тощо);
2. Сфері безпеки та охорони правопорядку (моніторинг масових заходів, прикордонний контроль, пошуково-рятувальні операції тощо);
3. Сільському господарстві (аерофотозйомка полів, обробка та оцінка стану посівів тощо);
4. Будівництві (інспекція стану об'єктів, контроль за будівництвом тощо);
5. Геодезії та картографії (аерофотозйомка для топографії, моніторинг ерозії, зсувів, паводків і стану повітря тощо);
6. Логістиці та доставці;
7. Інших сферах.

З огляду на широке застосування БПЛА у військовій сфері, зростає потреба у створенні ефективних засобів виявлення та пеленгації таких об'єктів. Традиційні методи активної радіолокації можуть бути неефективними або небажаними в умовах радіомовчання чи необхідності маскування власних засобів виявлення. У зв'язку з цим набувають актуальності пасивні методи виявлення БПЛА, які не випромінюють сигналів і працюють виключно у режимі приймання.

Одним із перспективних напрямів є використання інфразвукових датчиків – пристроїв, здатних реєструвати низькочастотні коливання повітря, що виникають внаслідок руху літальних апаратів. Інфразвук і низькочастотні акустичні коливання мають здатність поширюватися на значні відстані з мінімальним затуханням, що відкриває можливості для виявлення БПЛА навіть за межами прямої видимості.

Однак на сьогоднішній день існує низка невирішених технічних та наукових проблем, пов'язаних із застосуванням інфразвукових сенсорів для цієї мети: низький рівень сигналу на фоні природних шумів та завад від змінних метеоумов (вітер, грім, інші джерела інфразвуку); складність точного визначення напрямку на джерело сигналу за допомогою обмеженої кількості

датчиків; необхідність розробки ефективних алгоритмів фільтрації та обробки сигналів у режимі реального часу.

Таким чином, постає необхідність дослідження можливості та доцільності використання інфразвукових датчиків як основи для створення пасивного акустичного пеленгатора БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень.** Натепер існує кілька груп методів виявлення БПЛА (таблиця 1) [4-8].

Таблиця 1 – Методи виявлення БПЛА

№ п/п	Група методів	Переваги та недоліки	Обладнання (приклади)
1.	Радіотехнічні методи (радіолокаційні) <b>Опис:</b> виявлення БПЛА за допомогою відбитого радіосигналу	<b>Переваги:</b> можливість виявлення в будь-яку погоду, вдень і вночі. <b>Недоліки:</b> погане виявлення пластикових FPV-дронів із малою ЕПР (ефективною площею розсіювання).	РЛС малого радіусу дії, 3D-радар, FMCW-радар, PESA/AESA (AN/TPQ-50, Thales Ground Alerter 10)
2.	Радіотехнічна розвідка (радіомоніторинг) <b>Опис:</b> виявлення сигналів управління, телеметрії або відеопотоку дрона	<b>Переваги:</b> пасивність, не демаскує систему виявлення. <b>Недоліки:</b> не виявляє повністю автономні БПЛА без активного зв'язку.	Dedrone RF-300, Rohde & Schwarz ARDRONIS
3.	Оптичні методи (візуальні, ІЧ, УФ) <b>Опис:</b> використання камер видимого або інфрачервоного діапазону для фіксації силуету або теплового сліду БПЛА.	<b>Переваги:</b> точне розпізнавання типу, напрямку, кількості. <b>Недоліки:</b> залежність від освітлення, погодних умов, туману.	тепловізори FLIR, системи відеоаналітики з неймережами
4.	Акустичні методи <b>Опис:</b> виявлення шумів двигуна, пропелерів або електроніки дрона.	<b>Переваги:</b> ефективність в умовах лісу чи міської забудови, здатність виявляти всі типи БПЛА. <b>Недоліки:</b> чутливість до вітру, шуму, обмежена дальність.	DroneShield, CerbAir HYDRA
5.	Магнітометричні методи <b>Опис:</b> фіксують зміну магнітного поля від електродвигунів або акумуляторів БПЛА	<b>Переваги:</b> пасивність, нечутливість до погодних умов. <b>Недоліки:</b> ефективність лише на короткій відстані (до 50 м), застосовуються рідко.	Датчики для периметрової охорони
6.	Інтегровані системи (мультиmodalні) <b>Опис:</b> поєднання вищеперахованих методів у різних комбінаціях.	<b>Переваги:</b> найвища точність, стійкість до помилкових спрацювань. <b>Недоліки:</b> висока вартість, складність налаштування.	

**Метою роботи** є аналіз можливості використання мікромеханічного калориметричного сенсору коливальної швидкості частинок газу для реалізації пасивного акустичного пеленгатора БПЛА.

**Викладення основного матеріалу.** Активне використання БПЛА зумовило створення різноманітних типів. Їх розрізняють [9-12]:

1. За масою (злітною вагою): надлегкі (до 2 кг), легкі (2...25 кг), середньої важкості (25...150 кг), важкі (понад 150 кг);

2. За дальністю дії: близького радіуса (до 10 км), тактичного рівня (10...150 км), оперативного рівня (150...650 км), стратегічного рівня (понад 650 км);

3. За висотою польоту: низьковисотні (до 3 км), середньовисотні (3...9 км), висотні (понад 9 км);

4. За конструкцією: коптерні (багатороторні), літакові (з фіксованим крилом), гібридні (вертикального зльоту та приземлення);

5. За ступенем автономності: керовані (радіокеровані та на оптоволокну), напівавтономні, повністю автономні.

Кожен з типів БПЛА має свої особливості. Враховуючи вищевказане зрозуміло, що своєчасне виявлення БПЛА є достатньо складним завданням, що потребує різноманітних підходів.

З таблиці 1 видно, що найбільш універсальними з точки зору виявлення різних типів БПЛА є акустичні методи. Крім того акустичні методи пасивні, що, у разі військового використання, робить їх захищеними від засобів ураження противника. Але вони мають невеликий радіус дії і чутливість до сторонніх акустичних шумів.

За принципом дії акустичні датчики поділяють на [13-17]: п'єзоелектричні (принцип дії яких ґрунтується на прямому п'єзоелектричному ефекті), ємнісні (принцип дії ґрунтується на зміні ємності між пластинами через їх коливання під дією змінного тиску), оптичні (принцип дії ґрунтується на зміні інтерференційної картини, спричиненої звуковими хвилями), магнітострикційні (принцип дії ґрунтується на деформації феромагнітного матеріалу під дією тиску, спричиненого звуковими хвилями), мембранні (принцип дії ґрунтується на реєстрації коливань тонкої мембрани під дією акустичної хвилі).

Для низки конструкцій БПЛА характерним є висока інтенсивність сигналу низькочастотному акустичному діапазоні, наприклад БПЛА з електричним двигуном збуджують характерні гармоніки від обертання лопатей (рис. 1) [18].

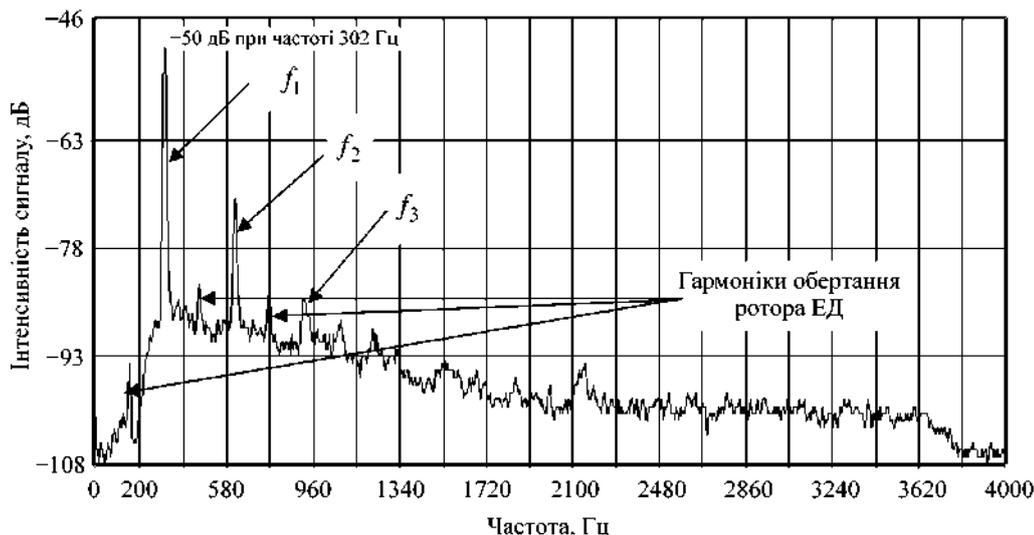


Рисунок 1 – Типовий спектр акустичного випромінювання БПЛА з електричним двигуном (частота обертання гвинта близько 9000 об./хв.) [18]

Останнім часом у військовій сфері все частіше використовують БПЛА з реактивними двигунами, що мають такі джерела акустичного сигналу як широкосмуговий шум турбулентного струменя, у якому домінують частоти від 10 до 16 Гц та від 315 до 6300 Гц, та тональні компоненти, пов'язані з обертанням ротора, вихлопом тощо (рис. 2) [19].

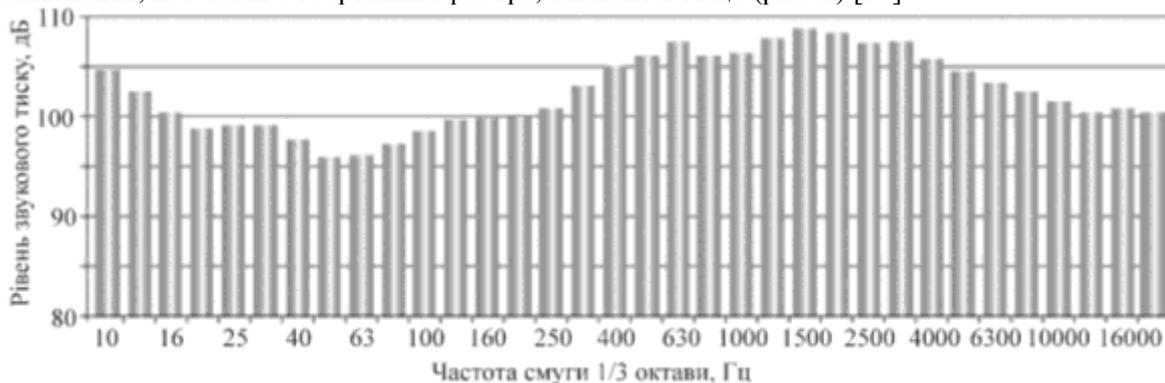


Рисунок 2 – Частотний спектр шумів реактивного БПЛА [19]

Тому для практичних застосувань виявлення інфразвукових і низькочастотних акустичних хвиль та їх оброблення мають суттєве значення.

Важливими перевагами інфразвукових і низькочастотних акустичних сигналів є мале загасання амплітуди, полегшене подолання та обминання перешкод, мала залежність від напрямку і швидкості вітру та шумів атмосферного тиску. За рахунок розповсюдження акустичних хвиль в інфразвуковому діапазоні (до одиниць Гц), вони фіксуються на великій відстані від об'єкта (для БПЛА – до 20...35 км) і не згасають, як це відбувається з електромагнітними хвилями на крапельках води в атмосфері. Використання датчиків інфразвукових сигналів дасть змогу підвищити роздільну здатність і зменшити вплив зовнішніх атмосферних явищ на точність локалізації цілей.

Все це дає підстави вважати акустичну пасивну пеленгацію на основі інфразвукових датчиків оптимальним варіантом виявлення та первинної ідентифікації БПЛА.

На наш погляд, як чутливий елемент у таких системах можуть бути використані теплові датчики потоку *Microflown* для акустичних вимірювань швидкості частинок або аналогічні [20].

Принцип дії теплових датчиків потоку *Microflown* базується на нагріванні дроту (або тонкоплівкового терморезистора, ізолюваного від кремнієвої підкладки) за рахунок проходження електричного струму. Коли на нього впливає потік середовища, він додатково охолоджується, що призводить до зміни температури. Це, у свою чергу, спричиняє зміну електричного опору терморезистора, генеруючи змінний електричний сигнал, який залежить від швидкості потоку. У конструкції первинного перетворювача використовують щонайменше два нагрітих дроти (тонкоплівкові терморезистори з активним підігрівом, виготовлені за МЕМС-технологією) або один нагрівач і два температурні датчики, розташовані на відстані кількох десятків – сотень мікрометрів один від одного. Це дає змогу реалізувати термокондуктометричний метод визначення швидкості акустичної хвилі шляхом вимірювання температурної різниці між сенсорами. Такий підхід забезпечує високу чутливість до малих швидкостей повітря, що робить його ефективним для акустичних вимірювань. Завдяки малим розмірам перетворювачів, виготовлених за МЕМС-технологією, їх можна розміщувати у трьох взаємно перпендикулярних площинах для точного визначення вектора швидкості акустичної хвилі в певній точці звукового поля. Це, в свою чергу, дає змогу обчислити просторове розташування джерела звуку або потенційної акустичної загрози.

Метод вимірювання інтенсивності акустичної хвилі, який застосовується в технології *Microflown*, базується на одночасному визначенні звукового тиску та векторної величини – швидкості «акустичної частинки». На відміну від скалярного тиску, швидкість руху середовища має напрям, тому для повної реконструкції вектора швидкості необхідно проводити вимірювання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Оскільки кожен сенсор *Microflown* реєструє швидкість лише в одному напрямку, для повного просторового аналізу використовують три датчики, розташовані ортогонально один до одного. У поєднанні з мікрофоном, що фіксує звуковий тиск, така система дає змогу повністю охарактеризувати звукове поле в конкретній точці простору. Це дає змогу обчислити вектор звукової інтенсивності в широкому частотному діапазоні – від 0,5 Гц до 20 кГц [21].

Як видно з рис. 1 та 2 найбільша інтенсивність шумів двигуна БПЛА лежить у діапазоні частот 300...600 Гц (для електричного) та 10...16 Гц і 315...6300 Гц (для реактивного), що узгоджується із чутливістю теплових датчиків потоку *Microflown* (рис. 3).

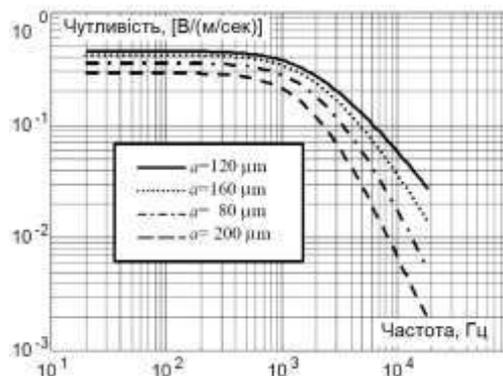


Рисунок 3 – Спектральна залежність чутливості потокового мікрофона ( $a$  – відстань між дротами) [20]

**Висновки.**

1. Проведений аналіз показав, що пасивні акустичні методи є ефективним засобом виявлення БПЛА різних типів, особливо у випадках, коли активні радіотехнічні системи недоцільні або небезпечні. При цьому необхідно враховувати навколишній фон акустичних завад.

2. Використання інфразвукових сенсорів дає змогу здійснювати пеленгацію об'єктів на значних відстанях завдяки низькому затуханню хвиль у цьому діапазоні.

3. Мікромеханічні калориметричні сенсори коливальної швидкості частинок газу, виготовлені за МЕМС-технологією, забезпечують високу чутливість і можливість визначення напрямку поширення акустичної хвилі.

4. Сенсори типу *Microflow* здатні працювати у частотних діапазонах, характерних для шумів електричних та реактивних двигунів БПЛА, що робить їх придатними для створення пасивних акустичних пеленгаторів.

5. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів обробки інфразвукових і низькочастотних акустичних сигналів і оптимізацію конструкції сенсорних модулів для підвищення точності пеленгації та завадостійкості системи.

**Інформаційні джерела**

1. Mendu B. State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects / B. Mendu, N. Mbuli // Drones. 2025. Vol. 9, Is. 4. PP. 265-1–265-27. DOI: [10.3390/drones9040265](https://doi.org/10.3390/drones9040265)

2. Faisal Abbas Shah S. Applications, challenges, and solutions of unmanned aerial vehicles in smart city using blockchain / S. Faisal Abbas Shah, T. Mazhar, T.A. Shloul, T. Shahzad, Y.-C. Hu, F. Mallek, H. Hamam // PeerJ Computer Science. 2024. Vol. 10. PP. e1776-1–e1776-35. DOI: [10.7717/peerj-cs.1776](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1776)

3. Molina A. A. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Applications in Construction Management / A. A. Molina, Y. Huang, Y. Jiang // Standards. 2023. Vol. 3, Is. 2. PP. 95–109. DOI: [10.3390/standards3020009](https://doi.org/10.3390/standards3020009)

4. Seidaliyeva U. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review / U. Seidaliyeva, L. Ilibayeva, K. Taissariyeva, N. Smailov, E. T. Matson // Sensors. 2024. Vol. 24, Is. 1. PP. 125-1–125-31. DOI: [10.3390/s24010125](https://doi.org/10.3390/s24010125)

5. Fallatah A. A Comprehensive Review of Emerging Techniques for Drone Detection and Identification / A. Fallatah, T. Alturki, Y. Alsabban, I. Radhwi // Robotics & Automation Engineering Journal. 2025. Vol. 6, Is. 3. PP. 555688-1–555688-7. DOI: [10.19080/RAEJ.2025.06.555688](https://doi.org/10.19080/RAEJ.2025.06.555688)

6. Rahman M. H. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions / M. H. Rahman, M. A. S. Sejan, M. A. Aziz, R. Tabassum, J.-I. Baik, H.-K. Song // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, Is. 5. PP. 879-1–879-42. DOI: [10.3390/rs16050879](https://doi.org/10.3390/rs16050879)

7. Kashi R. N. A survey and analysis of drone detection systems using a systems approach superposed on scenarios / R. N. Kashi, A. Prashanth, S. R. Kashi, G. Prabhakara // Systems Engineering. 2024. Vol. 27, Is. 3. PP. 598–636. DOI: [10.1002/sys.21735](https://doi.org/10.1002/sys.21735)

8. Zitar R. A. A Review of UAV Visual Detection and Tracking Methods / R. A. Zitar, M. Al-Betar, M. Ryalat, S. Kassaymeh // 9th Annual Conf. on Computational Science & Computational Intelligence (CSCI'22) (2022, Las Vegas, United States). DOI: [10.48550/arXiv.2306.05089](https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.05089)

9. Penn State University. (n.d.). Classification of the Unmanned Aerial Systems. Retrieved July 2025 from <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>

10. Types of Drones and UAVs (2025). Retrieved July 2025 from <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-drones>

11. Mohsan S. A. H. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends / S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, L. Yanlong, M. H. Alsharif, M. Khan // Intelligent Service Robotics. 2023. Vol. 16, Is. 1. PP. 109–137. DOI: [10.1007/s11370-022-00452-4](https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4)

12. Adoni W. Y. H. Investigation of Autonomous Multi-UAV Systems for Target Detection in Distributed Environment: Current Developments and Open Challenges / W. Y. H. Adoni, S. Lorenz, J. S. Fareedh, R. Gloaguen, M. Bussmann // Drones. 2023. Vol. 7, Is. 4. PP. 263-1–263-37. DOI: [10.3390/drones7040263](https://doi.org/10.3390/drones7040263)

13. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications (4th ed.) / Jacob Fraden. Springer New York, 2010. 663 p. ISBN 978-1-4419-6466-3
14. Edwards R. A. Chapter 16 – Measurement of Sound Intensity. Recording and Reproduction. The Doppler Effect // Physics for O.N.C. Courses. – Pergamon, 1970. PP. 260–276. ISBN 978-0-0801-3431-4
15. Mallegni N. Sensing Devices for Detecting and Processing Acoustic Signals in Healthcare / N. Mallegni, G. Molinari, C. Ricci, A. Lazzeri, D. La Rosa, A. Crivello, M. Milazzo // Biosensors. – 2022. Vol. 12, Is. 10. PP. 835-1–835-35. DOI: [10.3390/bios12100835](https://doi.org/10.3390/bios12100835)
16. What are the different types of acoustic sensors? (2024) <https://sinay.ai/en/what-are-the-different-types-of-acoustic-sensors>
17. Encyclopedia of Sensors and Biosensors / ed. Roger Narayan. Elsevier, 2023. 2958 p. ISBN 978-0-12-822548-6
18. Даник Ю. Г. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів / Ю. Г. Даник, І. В. Пуленко, М. В. Бугайлов // Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2015. Т. 4, № 71. С. 71–80. [https://doi.org/10.26642/tn-2014-4\(71\)-71-80](https://doi.org/10.26642/tn-2014-4(71)-71-80)
19. Konopka W. The influence of jet engine noise on hearing of technical staff / W. Konopka, M. Pawlaczyk-Łuszczynska, M. Śliwińska-Kowalska // Med Pr Work Health Saf. 2014. Vol. 65, Is. 5. PP. 583–592. DOI: [10.13075/mp.5893.00045](https://doi.org/10.13075/mp.5893.00045)
20. Honschoten J. W. Optimization of a thermal flow sensor for acoustic particle velocity measurements / J. W. Honschoten, V. Svetovoy, G. J. M. Krijnen, M. Elwenspoek // Journal of Microelectromechanical Systems. 2005. Vol. 14, Is. 3. PP. 436–443. DOI: [10.1109/JMEMS.2005.844848](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2005.844848)
21. Yntema D. R. A complete three-dimensional sound intensity sensor integrated on a single chip / D. R. Yntema, J. W. van Honschoten, R. J. Wiegerink, M. Elwenspoek // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008. Vol. 18. PP. 115004-1–115004-9. DOI: [10.1088/0960-1317/18/11/115004](https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/11/115004)

<sup>1</sup>Tatarchuk D. D., <sup>1</sup>Bohdan O. V., <sup>1</sup>Didenko Yu. V., <sup>1</sup>Lupyna B. I., <sup>2</sup>Zherebets O. M.

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

#### MICROMECHANICAL CALORIMETRIC SENSOR OF GAS PARTICLE VELOCITY FOR A PASSIVE ACOUSTIC UAV DIRECTION FINDER

*The article addresses the problem of detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) using passive methods, particularly acoustic ones. Modern UAV detection technologies are analyzed, and their advantages and limitations are presented. The feasibility of using infrasound sensors for the development of passive acoustic direction finders, which enable object detection without active radiation, is substantiated. The operating principle of a micromechanical calorimetric sensor of gas particle velocity based on heat flux is described, providing high sensitivity over a wide frequency range. It is shown that this type of sensor, fabricated using MEMS technology, makes it possible to determine the acoustic velocity vector in space, which serves as the basis for accurate direction finding of infrasound and low-frequency acoustic radiation sources. It is noted that the sensitivity of Microflown sensors corresponds to the spectral characteristics of the noise generated by both electric and jet UAV engines. The conducted analysis confirms the prospects of using micromechanical thermal sensors in passive acoustic detection and identification systems for unmanned aerial vehicles.*

**Keywords:** UAV, gas particle velocity sensor, acoustic direction finding, noise spectrum, Microflown.

Дата першого надходження  
статті до видання  
02.09.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
05.10.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 616-71 : 612.843.4 : 616.89-008.45  
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-25

Тимків П. О., Гевко О. В., Петров В. В.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ІНТЕГРОВАНА ПУПІЛОМЕТРІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

*В умовах соціально-економічної нестабільності та тривалого стресового навантаження, зокрема спричиненого воєнним конфліктом, зростає необхідність у сучасній та об'єктивній діагностиці психофізіологічного стану людини, включаючи рівень тривожності та стресу. Ці стани безпосередньо корелюють із дисрегуляцією вегетативної нервової системи (ВНС). Метою роботи є розроблення автоматизованої системи зворотного зв'язку з інтегрованою пупілометрією для моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини. Проведено аналіз наукових праць, що підтверджують зв'язок динаміки зінічних реакцій з активацією симпатичної ланки ВНС, когнітивним навантаженням та емоційними станами. На основі цих даних розроблено програмно-апаратний комплекс, що використовує пупілометрію для об'єктивного відстеження змін вегетативного балансу. Система передбачає механізм зворотного зв'язку для інтеграції психокорекційних методик, таких як арттерапія. В основу системи покладено об'єктивний маркер — Індекс симпатичної активації (ІСА), розрахований як відсоткове відношення площі зініці до площі рогівки.*

*Розроблена автоматизована система дозволяє неінвазивно та безперервно фіксувати параметри зініці (зокрема, розмір та швидкість реакції), які слугують маркерами рівня тривожності. Використання пупілометрії як інтегрованого показника дозволяє оцінити психологічний стан та ефективність психорелаксуючого впливу в режимі реального часу.*

**Ключові слова:** пупілометрія, автоматизована система, стрес, вегетативний баланс.

**Постановка проблеми.** Негативний вплив воєнного стану, соціально-економічної нестабільності, прискорення темпів життя та стресових умов праці позначається на психологічному стані людини. Тривалий військовий конфлікт в Україні сприяє зростанню частки таких психічних розладів, як депресія, тривога та посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) [1, 2]. Важливим аспектом цієї проблеми є потреба у сучасній оцінці рівня стресу, що допоможе запобігти негативним наслідкам та відповідній психокорекції.

**Аналіз стану досліджень.** Незаперечним є факт впливу стресу на психологічне та фізіологічне здоров'я. Відомо, що вегетативна нервова система (ВНС) та гіпоталамо-гіпофізарно-надниркова вісь (ГГНВ) регулюють реакцію організму людини на стресові ситуації [3]. Під час стресу в людини активується симпатична ланка ВНС і пригнічується парасимпатична. У свою чергу, ГГНВ продукує свій ефекторний гормон — кортизол. Гострий стрес вважається адаптивним механізмом, тоді як хронічний стрес стає дезадаптивним, що сприяє виникненню низки патофізіологічних механізмів, погіршує когнітивні функції та викликає дисрегуляцію ВНС.

Для оцінки стресу застосовують як суб'єктивні методи (анкетування), так і об'єктивні методики дослідження стану ВНС та ГГНВ. Шкала сприйнятого стресу (PSS) залишається найпопулярнішим інструментом для суб'єктивного вимірювання стресу. Проте її застосування обмежене: PSS не надає кількісної оцінки стресорів і не відображає хронічні стресові фактори з тривалістю понад місяць [4, 5]. Для оцінки тривожності також нерідко використовують Опитувальник тривожності Спілбергера [5, 6]. Через суб'єктивність анкетування та потенційну упередженість реакцій, доцільно застосовувати комплексний підхід. Значна частина методик оцінки стану ВНС і ГГНВ є громіздкими, а також складними для виконання та інтерпретації.

Біомаркерами стресу можна вважати кортизол, тестостерон, катехоламіни (адреналін, норадреналін), глікований СРБ, а також низку інших біологічно активних речовин [7]. Однак класичні біохімічні методики потребують вартісних реактивів, їх вимірювання часто є інвазивним (наприклад, забір крові) і відображає реальний стан із запізненням (особливо у випадку кортизолу). Хоча перспективним напрямком у цьому контексті є визначення кортизолу в слині, оскільки слина є неінвазивною та легкодоступною біологічною рідиною, здатною відображати і навіть прогнозувати рівень стресу [8].

Увага науковців сьогодні зосереджена на методах нейровізуалізації, таких як позитронно-емісійна томографія, ближня інфрачервона спектроскопія, магнітоенцефалографія та електроенцефалографія [9, 10, 11]. Проте ці методики також є складними, вартісними та вимагають тривалого часу для виконання й інтерпретації.

Ряд інших фізіологічних сигналів також може слугувати маркерами стресу, зокрема: варіабельність серцевого ритму, артеріальна осцилограма [12-17], електродермальна активність і температура шкіри. Однак особливий інтерес викликає такий феномен зміни розміру зіниці у відповідь на стрес. Дана методика вважається неінвазивною, недорогою та об'єктивною, а також дозволяє проводити моніторинг у режимі реального часу. Крім того, важливим є той факт, що розмір зіниці є прямим індикатором активності блакитної плями (locus coeruleus) - підкіркового ядра, що є ключовим центром норадреналіну, який регулює стан пильності та емоційного збудження.

Регуляція розміру зіниці є результатом антагоністичної дії двох гладких м'язів райдужки. Сфінктер зіниці забезпечує міоз (звуження) і перебуває під контролем парасимпатичної нервової системи. Натомість, дилататор зіниці спричиняє мідріаз (розширення), іннервуючись симпатичною нервовою системою. Ця подвійна вегетативна іннервація обумовлює можливість використання пупілометрії (вимірювання діаметра зіниці) як неінвазивного методу оцінки балансу та домінуючої активності симпатичної та парасимпатичної гілок вегетативної нервової системи [18,19]. Коливання діаметра зіниці людини (від 2 до 8 мм) забезпечує регулювання потоку світла, що надходить до ока, із кратністю приблизно в 16 разів. Упродовж останніх років світлова реакція зіниці - зміна її розміру у відповідь на світло та темряву - була добре вивчена. Проте, новітні дослідження, що стосуються уяви світла, привертають значну увагу та змінюють усталені погляди. Зокрема, низка вчених довела, що зіниці досліджуваних звужувались навіть тоді, коли вони подумки уявляли себе в яскравому світлі [20]. Цей факт переконливо свідчить про те, що світлова реакція зіниці не є суто рефлекторною, а значною мірою модулюється когнітивними факторами [21].

Сучасні дослідження розширюють уявлення про регуляцію розміру зіниці, демонструючи, що навіть нюхова стимуляція впливає на параметри світлового рефлексу [22]. Проте найбільш значущі відкриття стосуються зв'язку зіниці з когнітивними процесами. Розмір зіниць може змінюватись під час таких процесів, як когнітивне навантаження та конфлікт рішень [21, 23]. Тривале розумове перевантаження, наприклад, здатне зменшити розмір зіниць [24]. Водночас, розширення зіниці корелює з ускладненням завдання, здивуванням та емоційним збудженням [25, 26]. Примітно, що розширення зіниць, емоційне збудження та шкірна провідність тісно корелюють між собою, відображаючи переважання симпатикотонії (активності симпатичної нервової системи) [26]. З огляду на це, останніми роками все частіше наголошується, що пупілометрія стає інтегрованим показником різних станів уваги, оскільки вона відображає активність нейронних мереж, які відповідають за три основні компоненти уваги: тривожність, орієнтація та виконавчий контроль [27]. Таким чином, пупілометрія виходить за межі простого вимірювання фізіологічних реакцій і має потенціал стати цінним, неінвазивним інструментом для дослідження складних когнітивних процесів. Пупілометрія набуває особливого значення у пацієнтів із невідкладними нейрохірургічними станами, зокрема при гострій черепно-мозковій травмі (ЧМТ) [19], хворих із хворобою Альцгеймера, деменцією [24].

Найбільший інтерес у наукових колах становлять дослідження, які відображають стан активації певних гілок ВНС, зокрема симпатичної в умовах стресу. Наприклад, дані (Bogdanova et al., 2022) переконливо продемонстрували активацію симпатичної ланки, що виражалось розширенням зіниць, у відповідь на демонстрацію «роздратованих облич» [28]. Ця чутливість зіничної реакції до емоційних і стресових стимулів підтверджує потенціал методу. Як наслідок, методики автоматизованої пупілометрії активно впроваджуються та стають реальністю [29]. Це дозволяє не лише фіксувати дані об'єктивно, але й забезпечує необхідну точність і безперервність моніторингу, що є критично важливим для клінічної практики та наукових досліджень.

Отже, розмір зіниці зручно використовувати як маркер фізіологічного стану людини з огляду на його чутливість до співвідношення між симпатичною та парасимпатичною гілками ВНС. Імовірно, за допомогою цього маркера можна ефективно відстежувати також рівень тривожності. Тому метою нашого дослідження стало створення автоматизованої системи для моніторингу рівня тривожності з використанням пупілометрії.

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення автоматизованої системи на основі інтегрованої пупілометрії для об'єктивного моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини.

**Результати та їх обговорення.** На основі інтегрованої пупілометрії для об'єктивного моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини побудовано структурну схему автоматизованої системи з інтегрованою пупілометрією (рис. 1).

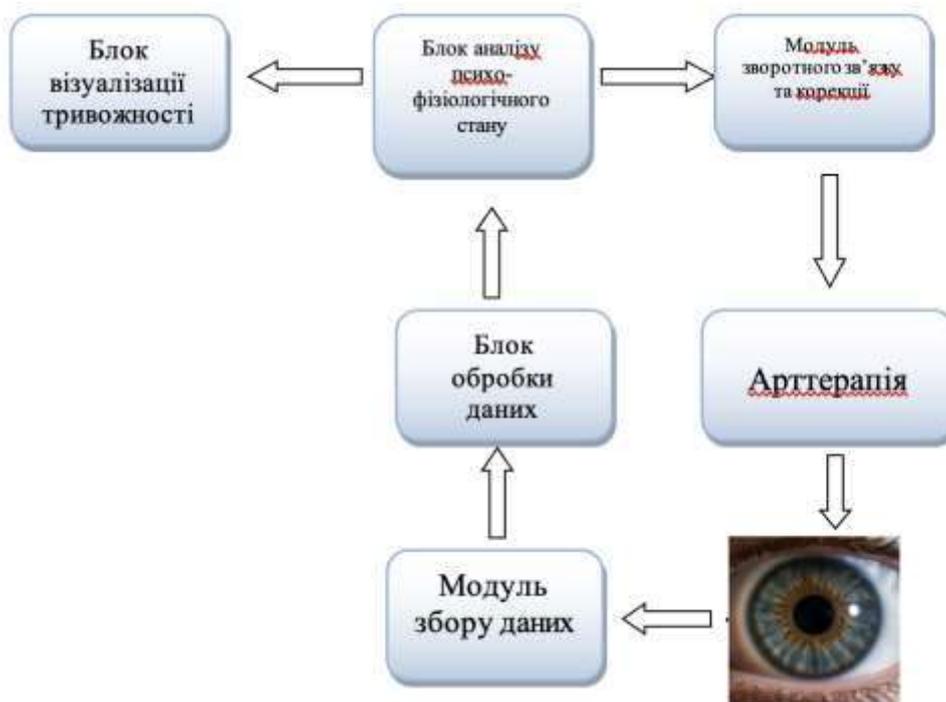


Рисунок 1 – Структурна схема Автоматизованої системи зворотного зв'язку з інтегрованою пупілометрією для моніторингу та корекції психологічного стану людини

Автоматизована система інтегрованої пупілометрії (АСП) побудована за модульним принципом і складається з п'яти основних блоків (рис. 2):

- 1) модуль відбору (отримання) зображень (МВЗ) - використано цифрова камера високої роздільності з ІЧ-фільтром, яка зменшує вплив нерівномірного освітлення;
- 2) модуль попередньої обробки (МПО) - проводить попереднє опрацювання та фільтрацію шумів, нормалізує контраст зображення та компенсує неоднорідність освітлення на оці;
- 3) модуль морфометричного аналізу (ММА) - виділяє і окреслює межі рогівки і зіниці та визначає їх площу і співвідношення;
- 4) модуль статистичного оцінювання (МСО) - проводить розрахунок індексу симпатичної активації (ІСА) та рівня тривожності;
- 5) модуль зворотного зв'язку (МЗЗ) - інтегрує отримані дані з індикативними показниками систем біологічного зворотного зв'язку для психокорекційних цілей.

Отже, блок обробки даних на структурній схемі складається з двох модулів: модуля попередньої Обробки та модуля морфометричного аналізу. Вони відповідають за очищення і підготовку зображення до аналізу та безпосереднє вимірювання ключового показника - індексу симпатичної активації. Відповідно блок аналізу психофізіологічного стану на структурній схемі складається з модуля статистичного оцінювання. Його функція полягає у трансформації отриманих морфометричних даних (зокрема, індексу симпатичної активації на діагностичний висновок. Це досягається шляхом статистичного порівняння поточних значень ІСА з нормативними та пороговими даними. Результатом роботи МСО є об'єктивна оцінка рівня тривожності та поточного вегетативного дисбалансу людини, що є основою для прийняття рішення про корекцію.

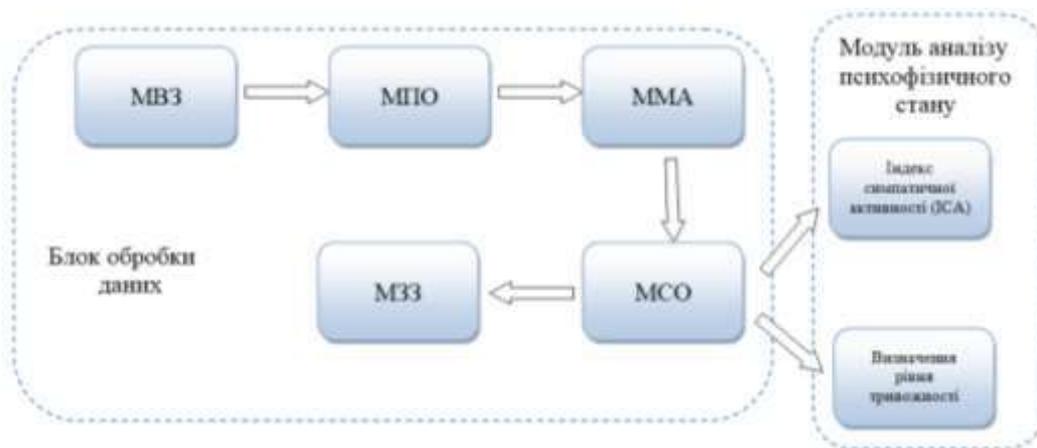


Рисунок 2 – Блок-схема автоматизована система інтегрованої пупілометрії (АСІП) для психокорекційних цілей

Загальний принцип роботи полягає у реєстрації зображення ока, подальшій автоматичній сегментації зон зіниці та рогівки, розрахунку їхніх площ і визначенні індексу симпатичної активації (ІСА) - у відсотках відношення площі зіниці до площі рогівки. Згідно з [18], цей показник може бути індикатором вегетативного дисбалансу. В основі методу лежить використання алгоритмів комп'ютерного зору бібліотеки OpenCV (Python) (рис. 3).

```

1 import cv2
2 import numpy as np
3 import glob
4 import os
5 import csv
6 # --- 1. Підготовка для збереження результатів ---
7 output_csv = "pupil_analysis_results.csv"
8 results = [{"id": "001", "Pupil_size(px)", "Iris_size(px)", "Ratio(%)"}]
9 # --- 2. Завантаження всіх фото з папки "eyes" ---
10 image_paths = glob.glob("eyes/*.jpg") + glob.glob("eyes/*.png")
11 for path in image_paths:
12     print(f"Обробка: {os.path.basename(path)}")
13     image = cv2.imread(path)
14     image = cv2.resize(image, (600, 400))
15     gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
16     # --- 3. Попередня обробка ---
17     gray = cv2.medianBlur(gray, 5)
18     gray = cv2.equalizeHist(gray)
19     # --- 4. Пошук кіл (HoughCircles) ---
20     circles = cv2.HoughCircles(
21         gray,
22         cv2.HOUGH_GRADIENT,
23         dp=1.2,
24         minDist=100,
25         param1=50,
26         param2=30,
27         minRadius=20,
28         maxRadius=120
29     )
30     # --- 5. Обробка знайдених кіл ---
31     if circles is not None:
32         circles = np.uint16(np.around(circles))
33         circles = sorted(circles[0, :, 1], key=lambda x: x[2])
34         if len(circles) == 2:
35             pupil = circles[0]
36             iris = circles[1]
37             r_pupil = pupil[2]
38             r_iris = iris[2]
39             area_pupil = np.pi * (r_pupil ** 2)
40             area_iris = np.pi * (r_iris ** 2)
41             ratio = (area_pupil / area_iris) * 100
42             # --- 6. Формування результату ---
43             output = image.copy()
44             cv2.circle(output, (pupil[0], pupil[1]), r_pupil, (0, 0, 255), 2)
45             cv2.circle(output, (iris[0], iris[1]), r_iris, (0, 255, 0), 2)
46             cv2.putText(output, f"Ratio: {ratio}%", (50, 50),
47                 cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (255, 255, 255), 2)
48             cv2.imshow("Result", output)
49             cv2.waitKey(500) # Чекаємо 0.5 секунди на екран
50             print(f"Результат: r_pupil={r_pupil}, r_iris={r_iris}, ratio={ratio}%",
51                 results.append((os.path.basename(path), r_pupil, r_iris, f"{ratio:.1f}"))
52             )
53         else:
54             print(f"Не знайдено кіл.")
55             results.append((os.path.basename(path), "", "", ""))
56         )
57     else:
58         print(f"Немає кіл у зображенні.")
59         results.append((os.path.basename(path), "", "", ""))
60     )
61 cv2.destroyAllWindows()
62 # --- 7. Збереження результатів у CSV ---
63 with open(output_csv, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
64     writer = csv.writer(f)
65     writer.writerow(results)
66 print(f"Результати збережено у файл: {output_csv}")
  
```

Рисунок 3 – Лістинг програми визначення індексу симпатичної активації (ІСА) в середовищі Python

На першому етапі роботи алгоритму АСІП проводиться конвертація зображення в градації сірого (GrayScale) для спрощення аналізу та препроцесинг фільтрації шумів (застосовано фільтр Гауса (Gaussian Blur) для усунення локальні сплесків яскравості). Далі проведено адаптивну бінаризацію (Adaptive Thresholding), що дозволяє досить точно виділити темнішу область зіниці навіть при нерівномірності освітлення. Для пошуку контурів (Canny Edge Detection) визначаємо межі зіниці та апроксимуємо визначені контури за допомогою еліпсу. Оскільки форма зіниці не є ідеально круглою, то в даному алгоритмі запропоновано використання еліптична моделі, при цьому площа еліпсу визначається за відомою формулою площі еліпса:

$$S_{\text{зіниці}} = \pi \cdot a \cdot b, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  - півосі еліпса.

На наступному етапі, для уникнення артефактів від відблисків, застосовується алгоритм Contour Approximation with Convex Hull, для забезпечення стійкості до яскравих рефлексів рогівки. Для визначення меж рогівки використано метод Хафа для детектування кіл (Hough Circle Transform). Попередня фільтрація (High-pass filter) для виділення контурів та пошук кільцевих структур проводиться у діапазоні 50–150 пікселів.

Площу рогівки визначаємо за відомою формулою площі кола:

$$S_{\text{рогівки}} = \pi \cdot r^2, \quad (2)$$

де  $r$  - радіус рогівки, визначений автоматично.

Порівнюючи площу зіниці до площі рогівки, визначаємо індекс симпатичної активації (ISA) [30]:

$$ISA = \frac{S_{\text{зіниці}}}{S_{\text{рогівки}}} \times 100\% \quad (3)$$

Для подальшого автоматизованого моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини прийємо типові порогові діапазони значення показника ISA:

- а) стан спокою: 18 - 22 %
- б) помірно когнітивне навантаження: 25 - 32 %
- в) високий рівень стресу або емоційне збудження: до 40 % [27, 30].

Використання цього показника дозволить кількісно (за допомогою показника ISA) оцінювати стан вегетативної нервової система та рівень психоемоційного навантаження. Результати опрацювання показали стабільність визначення результуючого показника ISA навіть при зміні яскравості освітлення на  $\pm 20$  %, що уможливило застосування АСП в режимі реального часу для моніторингу в клінічних і лабораторних умовах.

**Висновок.** Проведений аналіз наукових праць підтвердив доцільність використання пупілометрії як маркера вегетативного балансу. На цій основі було розроблено автоматизовану систему зворотного зв'язку, що забезпечує безперервний моніторинг рівня тривожності за розміром та реакцією зіниць. Розроблена автоматизована система інтегрованої пупілометрії забезпечує високу точність визначення площі зіниці та рогівки; реєстрацію динамічних змін у режимі реального часу; кількісну оцінку індексу симпатичної активації (ISA) - маркера рівня стресу, тривожності та когнітивного навантаження. Це дозволяє інтегрувати психокорекційні втручання, такі як арттерапія, для оперативного впливу на психофізіологічний стан. Отримані результати підтверджують, що інтегрована пупілометрія може бути ефективним, неінвазивним і доступним інструментом для об'єктивного контролю психофізіологічного стану людини.

#### Інформаційні джерела

1. Чепурко Г., & Соболев А. (2023). Ментальне здоров'я українців: виклики воєнного часу. Collection of Scientific Papers «ЛОГОС», (May 26, 2023; Boston, USA), 179–182. <https://doi.org/10.36074/logos-26.05.2023.048>
2. Yasenok V., Baumer A., Petrashenko V., Kaufmann M., Frei A., Rügger S, et al. (2025). Mental health burden of persons living in Ukraine and Ukrainians displaced to Switzerland: the mental health assessment of the Ukrainian population (MAP) studies. *BMJ Global Health*,10(e019557). <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2025-019557>
3. Ringgold V., & Rohleder N. (2025). Stress and Resilience: Associations of Stress Biomarkers With Different Conceptualizations of Resilience. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 61, 101463.
4. Malykhin N., Serrano J., Pietrasik W., & Hegadoren K. (2025). Effects of duration and intensity of psychological stressors on mental health outcomes. *Journal of Psychiatric Research*, 187, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2025.05.012>

5. Benítez-Agudelo, J.C., Restrepo, D., Navarro-Jimenez, E. et al. (2025). Longitudinal effects of stress in an academic context on psychological well-being, physiological markers, health behaviors, and academic performance in university students. *BMC Psychol* 13(753). <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03041-z>
6. Van Knippenberg, F. C. E., Duivenvoorden, H. J., Bonke, B., & Passchier, J. (1990). Shortening the state-trait anxiety inventory. *Journal of Clinical Epidemiology*, 43(9), 995–1000.
7. Ostapiuk-Karolczuk, J., Dziewiecka, H., Bojsa, P., et al. (2025). Biochemical and psychological markers of fatigue and recovery in mixed martial arts athletes during strength and conditioning training. *Scientific Reports*, 15(24234). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09719-z>
8. Budala, D. G., Luchian, I., Virvescu, D. I., Tudorici, T., Constantin, V., Surlari, Z., Butnaru, O., Bosinceanu, D. N., Bida, C., & Hancianu, M. (2025). Salivary Biomarkers as a Predictive Factor in Anxiety, Depression, and Stress. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(7), 488. <https://doi.org/10.3390/cimb47070488>
9. Nagasawa, Y., Ishida, M., Komuro, Y., et al. (2020). Relationship between cerebral blood oxygenation and electrical activity during mental stress tasks: Simultaneous measurements of NIRS and EEG. *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 1232, pp. 99–104). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_14).
10. Ahammed, K., & Ahmed, M. U. (2020). Quantification of mental stress using complexity analysis of EEG signals. *Biomedical Engineering Applications Basis Communications*, 32(2), 2050011. <https://doi.org/10.4015/S1016237220500118>.
11. Modi, N., Kumar, Y., Mehta, K., et al. (2025). Physiological signal-based mental stress detection using hybrid deep learning models. *Discovery Artificial Intelligence*, 5(166). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00412-8>
12. Вакуленко Д.В., Гевко О.В. Перспективні напрямки у створенні системи віртуальної реальності для корекції психофізіологічного стану пацієнта / Вакуленко Д.В., Гевко О.В., Вакуленко Л.О., Кіфер В.М. // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск 19. м. Луцьк, грудень 2021р. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С.27-33. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-19-4>
13. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Sas, L., Hevko, O. (2024). Effectiveness Application of the Analysis of Arterial Pulsations Registered during Blood Pressure Measurement Using the Oranta-AO Information System in Psychophysiology In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system*, (Chapter 26, pp. 419–430). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch26.pdf>
14. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Hevko, O. (2024). Prospect of Creating a Virtual Reality System with Feedback for the Correction of the Patient’s Psychological State Based on the Results of the Analysis of Arterial Pulsations Registered during Blood Pressure Measurement Using the Oranta-AO Information System In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system* (Chapter 37, pp. 587–599). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch37.pdf>
15. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Hevko, O. (2024). Systematic and Analytical Substantiation of the Use of Multimedia Environment for the Prevention And Rehabilitation of Various Diseases in Information System Oranta-AO In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system*, (Chapter 38, pp. 601–615). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch38.pdf>
16. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Kaverinsky, V., Malakhov, K., Grushko, V., & Hevko, O. (2025). Demonstrating the Validity of Methods for Studying and Evaluating the Results of Spectral Analysis of Arterial Oscillograms Recorded During Blood Pressure Measurement and AI Algorithms for Detecting Risks of Mental Diseases. In L. T. Duncan (Ed.), *Advances in health and disease* (Vol. 85, Chapter 1, pp. 1–43). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://www.scopus.com/pages/publications/105000585231?inward=>
17. Vakulenko, D., Hevko, O., Vakulenko, L., Smachylo, I., & Kocherga, Z. (2025). Telemedicine and psychocorrection: a new paradigm through healthcare data processing innovations. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2025)* (Vol. 4057, pp. 374–386). CEUR-WS.org. <https://ceur-ws.org/Vol-4057/paper23.pdf>

18. Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function. *Journal of Cognition*, 1(1), 16. doi: 10.5334/joc.18. PMID: 31517190; PMCID: PMC6634360. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6634360/>
19. Hsu, C.-H., & Kuo, L.-T. (2023). Application of Pupillometry in Neurocritical Patients. *Journal of Personalized Medicine*, 13(7), 1100. <https://doi.org/10.3390/jpm13071100>
20. Mathôt, S., Grainger, J., & Strijkers, K. (2017). Pupillary responses to words that convey a sense of brightness or darkness. *Psychological Science*, 28(8), 1116–1124. DOI: [10.1177/0956797617702699](https://doi.org/10.1177/0956797617702699)
21. Ebitz, R. B., & Moore, T. (2019). Both a Gauge and a Filter: Cognitive Modulations of Pupil Size. *Frontiers in Neurology*, 9, 1190. doi: 10.3389/fneur.2018.01190. PMID: 30723454; PMCID: PMC6350273.
22. Hatsukawa, H., & Ishikawa, M. (2023). Psychological states affecting initial pupil size changes after olfactory stimulation in healthy participants. *Scientific Reports*, 13(16050). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43004-1>
23. Benitez, V. L., & Robison, M. K. (2022). Pupillometry as a Window into Young Children's Sustained Attention. *Journal of Intelligence*, 10(4), 107. doi: 10.3390/jintelligence10040107. PMID: 36412787; PMCID: PMC9680391.
24. Castellotti, S., Castaldi, E., Blini, E., & Arrighi, R. (2025). Pupil size as a biomarker of cognitive (dys)functions: Toward a physiologically informed screening of mental states. *Acta Psychologica*, 253, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.104720>
25. Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602–607. doi: [10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x).
26. De Zorzi, L., Ranfaing, S., Honoré, J., & Sequeira, H. (2021). Autonomic reactivity to emotion: A marker of sub-clinical anxiety and depression symptoms? *Psychophysiology*, 58(4), e13774. doi: [10.1111/psyp.13774](https://doi.org/10.1111/psyp.13774).
27. Strauch, C., Wang, C. A., Einhäuser, W., Van der Stigchel, S., Naber, M., et al. (2022). Pupillometry as an integrated readout of distinct attentional networks. *Trends Neurosci.* Aug;45(8):635-647. doi: 10.1016/j.tins.2022.05.003.
28. Bogdanova, O. V., Bogdanov, V. B., Miller, L. E., & Hadj-Bouziane, F. (2022). Simulated proximity enhances perceptual and physiological responses to emotional facial expressions. *Scientific Reports*, 12(1), doi: [10.1038/s41598-021-03587-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-03587-z)
29. Lussier, B. L., Olson, D. W. M., & Aiyagari, V. (2019). Automated Pupillometry in Neurocritical Care: Research and Practice. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 19, 71, doi: [10.1007/s11910-019-0994-z](https://doi.org/10.1007/s11910-019-0994-z).
30. Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2015). Memory, emotion and pupil diameter: Repetition of natural scenes. *Psychophysiology*, 52(9), 1186–1193. doi: [10.1111/psyp.12442](https://doi.org/10.1111/psyp.12442)

**Tymkiv P., Hevko O., Petrov V.V.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## INTEGRATED PUPILLOMETRY AS A TOOL FOR AUTOMATED MONITORING OF HUMAN PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE

*In the context of socio-economic instability and prolonged stress load, particularly that caused by military conflict, there is a growing need for timely and objective diagnosis of the human psychophysiological state, including levels of anxiety and stress. These states directly correlate with the dysregulation of the autonomic nervous system (ANS). The aim of this work is the development of an automated feedback system with integrated pupillometry for monitoring and diagnosing the human psychophysiological state.*

*An analysis of scientific literature was conducted, confirming the link between the dynamics of pupillary reactions and the activation of the sympathetic branch of the ANS, cognitive load, and emotional states. Based on this data, a software and hardware complex was developed, which uses pupillometry for the objective tracking of changes in autonomic balance. The system incorporates a feedback mechanism for the integration of psychocorrective methods, such as art therapy. The system is based on an objective marker—the Sympathetic Activation Index (SAI), calculated as the percentage ratio of the pupil area to the cornea area. The developed automated system allows for the non-invasive*

*and continuous fixation of pupillary parameters (specifically, size and reaction speed), which serve as markers of the anxiety level. The use of pupillometry as an integrated readout allows for the assessment of the psychological state and the effectiveness of psychorelaxing influence in real-time.*

*Conclusions: The developed automated system with integrated pupillometry has high potential to become a valuable and accessible tool for the objective monitoring of stress and anxiety levels, as well as for controlling the effectiveness of psychocorrective measures across a wide range of applications.*

**Key words:** *Pupillometry, Automated system, Stress, Autonomic balance*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
17.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
12.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.

УДК 004.93:612.172

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-26

Уніят С. В., Хвостівський М. О.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## АДАПТИВНИЙ ФАЗОВО-КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ВІДНОВЛЕННЯ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ ПІСЛЯ ФІЗИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ПУЛЬСОВИМИ СИГНАЛАМИ

У статті запропоновано адаптивний фазово-кореляційний метод визначення часу відновлення серцево-судинної системи після фізичного навантаження за пульсовими сигналами. Метод ґрунтується на аналізі фазової узгодженості сигналу в ковзних часових вікнах, що дає змогу відстежувати локальні зміни структури серцевого ритму в умовах нестаціонарності. Середня амплітуда фазово-кореляційного спектра використовується як показник впорядкованості сигналу, який зменшується у фазі навантаження та поступово зростає у процесі відновлення. Для автоматичного визначення моменту відновлення застосовано адаптивний поріг, побудований за критерієм Неймана–Пірсона з корекційним коефіцієнтом зниження, що забезпечує високу чутливість до фазових змін і стійкість до шумових артефактів. Моделювання в середовищі Matlab підтвердило ефективність методу, який дозволяє точно фіксувати момент стабілізації ритму навіть за значних флуктуацій сигналу. Запропонований підхід може бути використаний для оцінки функціонального стану спортсменів, моніторингу процесів відновлення в кардіологічній практиці та впровадження у телемедицинські системи біомоніторингу.

**Ключові слова:** пульсовий сигнал, фазово-кореляційний аналіз, адаптивний поріг, критерій Неймана–Пірсона, час відновлення, серцево-судинна система.

**Постановка проблеми.** Аналіз пульсових сигналів набуває дедалі більшого значення у спортивній фізіології, кардіології та системах дистанційного моніторингу, оскільки пульс відображає не лише частоту серцевих скорочень, а й комплексну реакцію серцево-судинної системи на навантаження. Після інтенсивної роботи форма та регулярність пульсових хвиль змінюються, що робить цей сигнал чутливим індикатором процесів відновлення (Düking et al., 2020; Diġab H. et al., 2018) [1, 3]. Точне визначення моменту, коли серцевий ритм повертається до стабільного стану, дозволяє об'єктивно оцінювати функціональний стан організму, ступінь тренуваності та ризик перевантаження.

**Аналіз стану досліджень.** Існуючі методи можна поділити на кілька груп. Найпростіші часові показники, такі як Heart Rate Recovery (HRR), відображають швидкість зниження ЧСС після навантаження, але не враховують нестаціонарність сигналу. Підходи на основі варіабельності серцевого ритму (HRV) та не-лінійних індексів (DFA  $\alpha_1$ ) дають змогу простежити відновлення автономної регуляції (Mikalsen et al., 2023) [2], проте чутливі до шуму. Морфологічні індекси Vascular Recovery Rate (VRR), побудовані на характеристиках фотоплетизмографічної хвилі, оцінюють периферичні судинні зміни (Diġab H. et al., 2018) [3], а спектральні та фазово-кореляційні методи (Masinelli et al., 2021) [4] виявляють стабілізацію ритму навіть за наявності артефактів. Водночас сучасні підходи машинного навчання поєднують ці ознаки для комплексної оцінки стану відновлення (Liu et al., 2024) [5].

**Мета дослідження.** Незважаючи на різноманіття підходів, залишається проблема точного автоматичного визначення моменту відновлення в умовах нестаціонарності та шуму. Це зумовлює актуальність розроблення методів, що адаптивно враховують індивідуальну динаміку пульсового сигналу. Одним із перспективних напрямів є фазово-кореляційний аналіз із адаптивним порогом Неймана–Пірсона, коригованим коефіцієнтом зниження  $\alpha$ , який дозволяє гнучко враховувати варіабельність базового сигналу та підвищувати чутливість до фазових змін у процесі відновлення.

**Результати та обговорення.** Після фізичного навантаження пульсовий сигнал змінюється **нестационарно:**

- частота та форма пульсу поступово повертаються до базового стану;
- змінюється регулярність серцевих скорочень;
- фаза окремих періодів може коливатись.

Якщо аналізувати весь сигнал одразу, то ці зміни «змажуться» у глобальних оцінках, і ми не зможемо точно визначити момент, коли структура сигналу повертається до нормального стану. Ковзне вікно дозволяє розглядати сигнал локально в часі, тобто відслідковувати, як фазова когерентність еволюціонує у кожному часовому інтервалі. Для аналізу ПС у ковзних вікнах довжиною  $L$  відліків з перекриттям кроку  $\Delta$  для кожного вікна  $n$  виділяється відрізок сигналу (1):

$$x_n[k] = x[k+n], \quad k = 0, 1, \dots, L-1. \quad (1)$$

Пульсовий сигнал  $x_n[k]$  у вікні можна розкласти на дві частини (2):

$$x_n[k] = \bar{x}_n + \tilde{x}_n[k], \quad k = 0, 1, \dots, L-1. \quad (2)$$

де  $\bar{x}_n = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x_n[k]$  — середнє значення у вікні;

$\tilde{x}_n[k]$  — центрована (після віднімання середнього) частина сигналу.

Якщо залишити постійну складову  $\bar{x}_n$ , вона буде вносити систематичний зсув у подальші обчислення. Тому від сигналу у вікні віднімається середнє значення (3):

$$\tilde{x}_n[k] = x_n[k] - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x_n[k]. \quad (3)$$

Після інтенсивного навантаження серцево-судинна система реагує зміною частоти серцевих скорочень, регулярності пульсових хвиль та стабільності фаз між послідовними циклами.

На початку відновлення серцевий ритм зазвичай є нестабільним — фази пульсових циклів змінюються від періоду до періоду. У міру відновлення організму сигнал знову набуває регулярної гармонічної структури з відносно стабільною фазою [6].

Звичайні амплітудні чи спектральні методи (наприклад, аналіз потужності) добре відображають частоту та загальну енергію сигналу, але погано вловлюють фазову узгодженість. Натомість фазово-кореляційний аналіз спеціально призначений для оцінки синфазності між різними зсувами сигналу — тобто, наскільки повторюваним є його фазовий малюнок у часі.

З урахуванням вище сказаного, для набору часових зсувів  $u \in [-U, U]$  обчислюється фазово-кореляційна функція (4):

$$B_{k_h}(u) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \tilde{x}_n[k+u] \tilde{x}_n[k] e^{-j2\pi k_h \frac{t_k}{T}} \quad (4)$$

де  $k_h=1$  — номер гармоніки;

$T = \frac{1}{f_0}$  — період базової гармоніки;

$t_k = \frac{k}{f_s}$  — часова координата відліку у вікні.

Фазовий множник  $e^{-j2\pi k_h \frac{t_k}{T}}$  виконує синфазну демодуляцію, що дозволяє оцінити періодичні компоненти сигналу з частотою  $f_0$ . Домінантна частота  $f_0$  (5) визначається як частота з максимальною енергетичною складовою у спектрі сигналу (зазвичай у діапазоні 0,6-3,0 Гц, що відповідає 36-180 уд/хв):

$$f_0 = \arg \max_{f \in [0.6, 3.0]} P(f), \quad (5)$$

де  $P(f)$  – спектральна густина потужності сигналу.

Це дозволяє адаптувати метод до індивідуального пульсу кожної людини - у когось пульс може бути 70 уд/хв, у когось 120 уд/хв.

Пульсовий сигнал містить як корисну періодичну компоненту, так і шум, артефакти дихання, рухові впливи тощо. Якщо дивитися на фазово-кореляційний спектр  $|B_{kn}(u)|$  окремо для кожного зсуву, він може містити локальні піки, викликані випадковими флуктуаціями.

Усереднення по всіх  $u$  діє як фільтр, який:

- підкреслює сталі фазові зв'язки (бо вони проявляються при всіх зсувах);
- згладжує випадкові фазові збурення;
- зменшує дисперсію оцінки.

Тому, для кожного вікна  $n$  визначається середня амплітуда фазово-кореляційного спектра (6):

$$A[n] = \frac{1}{2U+1} \sum_{u=-U}^U |B_{kn}(u)|. \quad (6)$$

Ця послідовність  $A[n]$  відображає ступінь фазової впорядкованості сигналу у часі. Після фізичного навантаження  $A[n]$  зазвичай зменшується, а в процесі відновлення зростає до стабільного рівня. Таким чином,  $A[n]$  виступає надійною та стійкою метрикою, придатною для подальшого автоматичного аналізу, зокрема визначення часу відновлення після фізичного навантаження.

Для автоматичного визначення моменту відновлення введено адаптивний поріг на основі статистики базового сегмента сигналу.

На початковому відрізку під час фази спокою обчислюються:

$$\mu_{ref} = \frac{1}{n_{ref}} \sum_{i=1}^{n_{ref}} A[i], \quad (7)$$

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\frac{1}{n_{ref}-1} \sum_{i=1}^{n_{ref}} (A[i] - \mu_{ref})^2}. \quad (8)$$

Використовуючи критерій Неймана–Пірсона із заданою ймовірністю хибної тривоги  $P_{fa}$  (зазвичай для медицини  $\{0,001\ 0,01\ 0,1\}$ ), визначається квантиль нормального розподілу (9):

$$k_{NP} = \Phi^{-1}(1 - P_{fa}), \quad (9)$$

де  $\Phi^{-1}$  – обернена функція розподілу стандартного нормального закону.

Вибір  $P_{fa}$  задає ймовірність хибного спрацювання (сигнал перетнув поріг, хоча відновлення ще не відбулося). Поріг адаптується до локальної варіабельності сигналу, бо  $\mu_0$  і  $\sigma_0$  оцінюються на початковому сегменті сигналу. Це дозволяє автоматично коригувати поріг для різних людей, фізичних станів та шумових умов.

Іноді  $k_{NP}$  поріг трохи занадто високий через великий  $\sigma_0$ , що може відтермінувати детекцію часу відновлення. Тоді введено корекційний коефіцієнт зниження порогу  $\alpha$ :

$$T_{thr} = \mu_{ref} + k_{NP} \sigma_{ref} (1 - \alpha), \quad 0 < \alpha \leq 1. \quad (10)$$

У практичних застосуваннях (біомедичний аналіз, зокрема серцево-судинні сигнали):

- Якщо  $\alpha = 1$ , маємо класичний поріг Неймана–Пірсона – високий рівень достовірності, але низька чутливість (можна пропустити момент відновлення).
- Якщо  $\alpha < 1$ , поріг знижується – підвищується чутливість системи до сигналу відновлення, але зростає ймовірність хибного спрацювання.

Зниження порогу ( $\alpha < 1$ ) дозволяє раніше зафіксувати момент відновлення серцевого ритму, навіть якщо пульсовий сигнал ще містить незначні залишкові флуктуації. Це відповідає

фізіологічному процесу поступового нормування серцево-судинної діяльності після навантаження.

Поріг  $T_{thr}$  (10) автоматично підлаштовується до індивідуальної статистики сигналу, а зниження порогу за рахунок коефіцієнта  $\alpha$  дозволяє зафіксувати відновлення навіть при високій варіабельності ранніх вікон (шум, рухи, артефакти).

Послідовність  $A[n]$  – це середня амплітуда фазово-кореляційного спектра у кожному ковзному вікні. Вона відображає ступінь впорядкованості серцевого ритму:

- Високе  $A[n]$  → ритм регулярний, фази узгоджені.
- Низьке  $A[n]$  → ритм дезорганізований, фази «розсинхронізовані».

Після фізичного навантаження серцевий ритм стає нестабільним, і  $A[n]$  падає до мінімального значення. Цей мінімум відповідає піку навантаження, коли серцево-судинна система максимально порушена.

Нехай  $n_{min}$  – індекс мінімального значення послідовності  $A[n]$ , що відповідає піковому навантаженню (11):

$$n_{min} = \arg \min_n A[n]. \quad (11)$$

Подальше визначення часу відновлення здійснюється лише після  $n_{min}$ , тобто ігноруються попередні піки або коливання сигналу, щоб не сплутати їх із реальним відновленням. Обмеження аналізу початком після  $n_{min}$  гарантує фіксацію справжнього відновлення, а не локальних флуктуацій сигналу. Тобто  $n_{min}$  виступає точкою відліку, після якої відновлення серцевого ритму реально починається (рис. 1).

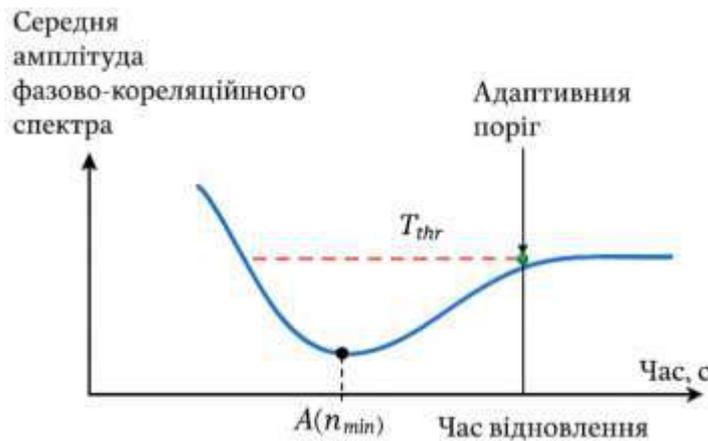


Рисунок 1 – Ілюстрація моментів часу

Час відновлення визначається як перше перетинання кривої  $A[n]$  із адаптивним порогом  $T_{thr}$  після моменту мінімуму:

$$n_{cross} = \min \{n > n_{min} | A[n-1] < T_{thr}, A[n] \geq T_{thr}\}. \quad (12)$$

Відповідний момент часу складе (13):

$$t_{rec} = n_{cross} \Delta t, \quad (13)$$

де  $\Delta t$  – часовий крок між вікнами. Якщо такого перетину не виявлено, вважається, що час відновлення не був досягнутий у межах аналізованого сигналу.

Час відновлення після фізичного навантаження обчислюється з виразу як різниця між  $t_{rec}$  та  $t_{n_{min}}$  (14):

$$\Delta t_{rec} = t_{rec} - t_{n_{min}}. \quad (14)$$

Час  $\Delta t_{rec}$  кількісно характеризує тривалість відновлення організму, що є ключовим показником функціонального стану та фізіологічної працездатності.

На рис. 1 зображено алгоритм визначення часу відновлення після фізичного навантаження за послідовністю  $A[n]$ , де фіксуються моменти пікового навантаження  $t_{min}$  та відновлення  $t_{rec}$ .

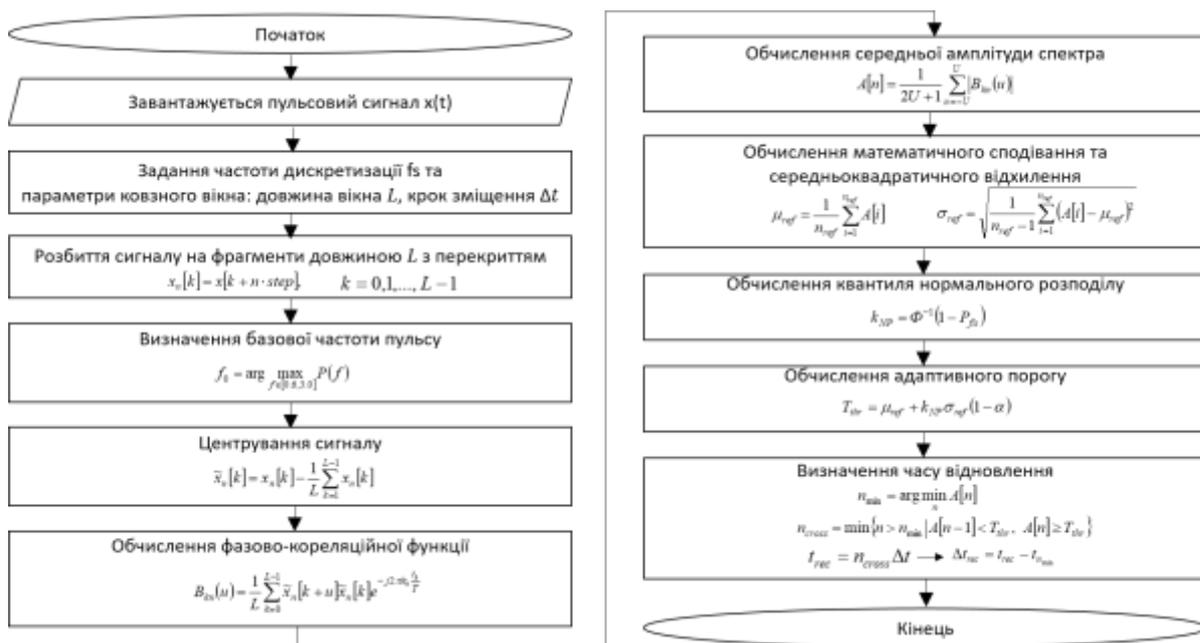


Рисунок 2 – Алгоритм визначення часу відновлення після фізичного навантаження

Алгоритм (рис. 2) відображає послідовність дій для автоматичного обчислення часу відновлення організму за різницею між цими моментами.

На рисунку 3 наведено часову реалізацію пульсового сигналу, зареєстрованого у процесі навантаження та відновлення.

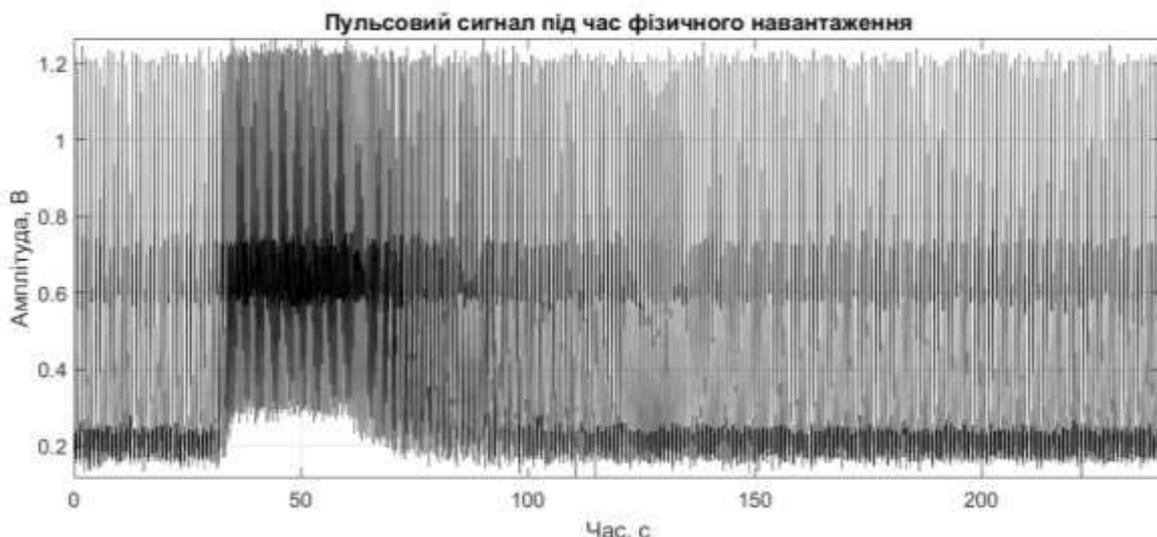


Рисунок 3 – Реалізація ПС під час фізичного навантаження

На початку спостерігається підвищена частота та деформація пульсових хвиль, що відповідає піковій фізіологічній відповіді на навантаження. Надалі сигнал поступово стабілізується - збільшується регулярність та гармонійність хвиль. Це відображає перехід від стану стресу до стабілізованого серцевого ритму, що є важливим індикатором відновлення автономної регуляції.

Після обробки ПС (рис. 3) із застосуванням фазово-кореляційного аналізу та адаптивного порогу Неймана–Пірсона в середовищі Matlab отримано три ключові графічні результати (рис. 4-5), які відображають динаміку відновлення серцево-судинної системи після фізичного навантаження.

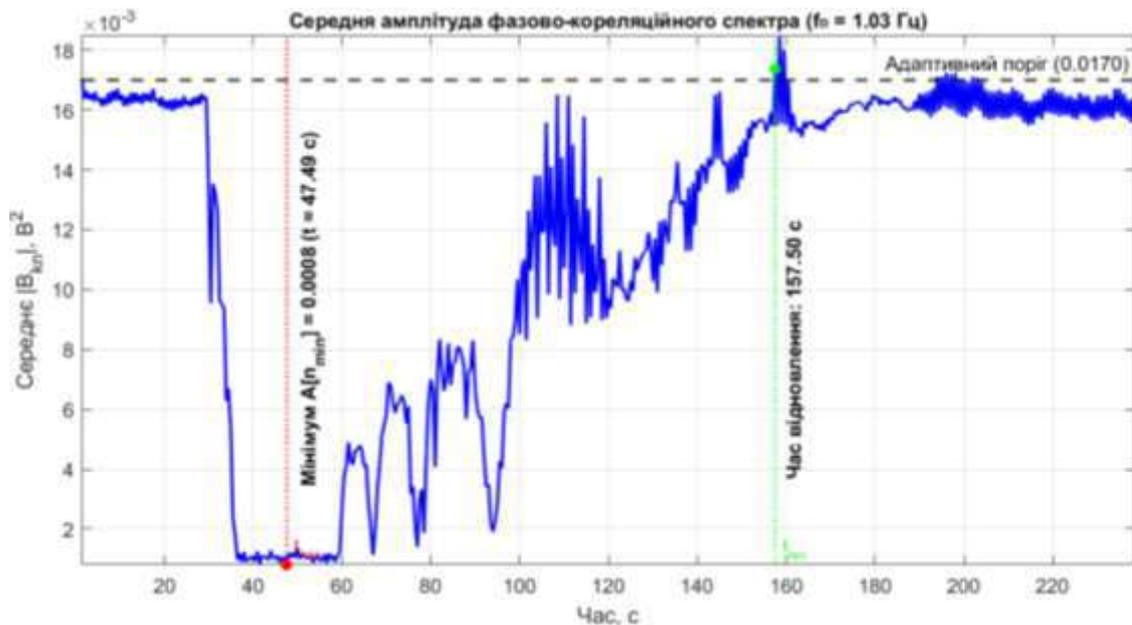


Рисунок 4 – Середня амплітуда фазово-кореляційного спектра

Графік на рис. 4 ілюструє часову еволюцію середньої амплітуди фазово-кореляційного спектра  $A[n]$ , яка характеризує ступінь фазової впорядкованості пульсового сигналу. У момент  $t_{min}$  (пунктирна лінія) спостерігається мінімум  $A[n]$ , що відповідає піковому навантаженню – фазова структура сигналу найбільш розбалансована. Подальше зростання  $A[n]$  вказує на відновлення стабільності ритму. Перетин кривої  $A[n]$  з адаптивним порогом (зелена пунктирна лінія  $t_{rec}$ ) визначає момент відновлення, коли фазова когерентність сигналу повертається до рівня спокою.

Таким чином,  $A[n]$  є інформативною мірою для автоматичного визначення моменту відновлення навіть за наявності шуму та артефактів.

На рисунку 5 наведено фазово-кореляційний спектр пульсового сигналу (спектрограму).

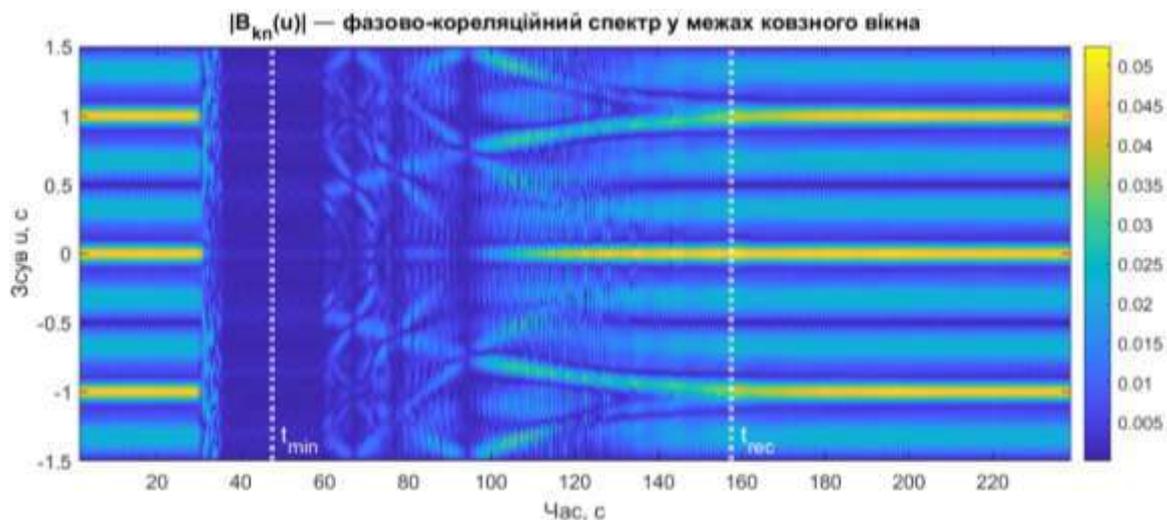


Рисунок 5 – Фазово-кореляційний спектр ПС (спектрограма)

На спектрограмі (рис. 5) відображено часово-зсувну залежність модуля фазово-кореляційного спектра  $|B_{kn}(u)|$ . У період пікового навантаження ( $t_{min}$ ) спектр розмитий, енергія розподілена нерівномірно, що вказує на фазову дестабілізацію та нерегулярність пульсових хвиль. Після цього, у фазі відновлення ( $t_{rec}$ ), спектр стає більш структурованим, формується чіткий симетричний максимум поблизу нульового зсуву, що відображає відновлення синфазності між циклами. Накладені вертикальні лінії часу  $t_{min}$  та  $t_{rec}$  дозволяють наочно співставити часові події між графіками ( $A[n]$ ) та спектрограмою.

**Висновки.** У роботі представлено адаптивний фазово-кореляційний метод визначення часу відновлення серцево-судинної системи після фізичного навантаження, що враховує нестационарність і варіабельність пульсового сигналу. Використання фазово-кореляційного аналізу в ковзному вікні дозволило відстежити локальні зміни фазової структури сигналу та визначити момент, коли серцевий ритм повертається до стабільного стану. Запропонований адаптивний поріг, побудований за критерієм Неймана–Пірсона з корекційним коефіцієнтом зниження  $\alpha$ , забезпечує гнучке налаштування до індивідуальних особливостей сигналу та підвищує чутливість системи до фазових змін у процесі відновлення. Результати моделювання підтвердили, що середня амплітуда фазово-кореляційного спектра є інформативним показником впорядкованості серцевого ритму і може бути використана для автоматичного моніторингу відновлення навіть за умов шумових спотворень. Отримані результати свідчать про ефективність і перспективність розробленого методу для застосування у спортивній фізіології, біомедичних вимірюваннях та телемедичних системах оцінювання функціонального стану організму.

#### Інформаційні джерела

1. Düking P., Wernhart S., Guazzi M., Halle M. Correlation of Heart Rate Recovery, Aerobic Physical Activity and Performance: A Sub-analysis of the EURO-EX Trial. *German Journal of Sports Medicine*. 2020. Vol. 71, No. 1. P. 19-24. DOI: 10.5960/dzsm.2019.402.
2. Mikalsen A., Rogers B., Gronwald T., Hoos O. Heart Rate Variability-Derived Thresholds for Exercise Intensity Prescription in Endurance Sports: A Systematic Review. *Sports Medicine – Open*. 2023 Jul 18;9(1):59. DOI: 10.1186/s40798-023-00607-2.
3. Dijab H., Alastruey J., Charlton P.H. Measuring vascular recovery rate after exercise // Proceedings of the 5th International Electronic Conference on Sensors and Applications (ECSA 2018). 2018. Vol. 4, No. 1. Article 12. DOI: 10.3390/ecsa-5-05746.
4. Masinelli G., Dell’Agnola F., Valdés A. A., Atienza D. SPARE: A Spectral Peak Recovery Algorithm for Photoplethysmographic Signals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2021; 21(8):2725. DOI: 10.3390/s21082725.
5. Liu P., Song Y., Yang X., Li D., Khosravi M. Medical Intelligence Using PPG Signals and Hybrid Learning for Fatigue and Recovery Prediction. *Scientific Reports*. 2024. 14:16149. DOI: 10.1038/s41598-024-66839-8.
6. Khvostivskyi M., Khvostivska L., Dediv I., Yavorskyi I., Uniiat S. Medical Computer System for Diagnosing the State of Human Vessels. Proceedings of the 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024). Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. P. 196-207. ISSN 1613-0073.

Uniiat S., Khvostivskyi M.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

#### ADAPTIVE PHASE-CORRELATION METHOD FOR DETERMINING CARDIOVASCULAR RECOVERY TIME AFTER PHYSICAL EXERCISE BASED ON PULSE SIGNALS

*The article proposes an adaptive phase-correlation method for determining the recovery time of the cardiovascular system after physical exercise based on pulse signals. The method is grounded on the analysis of phase coherence within sliding time windows, which enables tracking local structural changes in the cardiac rhythm under non-stationary conditions. The mean amplitude of the phase-correlation spectrum is employed as an indicator of signal regularity, which decreases during the loading phase and gradually increases throughout recovery. To automatically determine the recovery moment, an adaptive threshold based on the Neyman–Pearson criterion with a reduction correction coefficient is introduced, providing high sensitivity to phase variations and robustness against noise artifacts. Modeling in the Matlab environment confirmed the effectiveness of the proposed approach, which allows precise detection of rhythm stabilization even under significant signal fluctuations. The developed method can be applied for assessing the functional state of athletes, monitoring recovery processes in cardiology, and integrating into telemedicine bio-monitoring systems.*

**Key words:** pulse signal, phase-correlation analysis, Neyman–Pearson criterion, adaptive threshold, recovery time, cardiovascular system.

Дата першого надходження  
статті до видання  
16.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
15.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р

УДК 620.179

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-27

Чалий В. Д., Мороз С. А., Лишук В. В., Приступа С. О., Євсюк М. М.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ ДАВАЧІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

У роботі представлено систематизований огляд сучасних типів давачів акустичної емісії (АЕ), що застосовуються у системах технічної діагностики та моніторингу процесів механічної обробки. Проаналізовано принципи дії, конструктивні особливості та метрологічні характеристики п'єзоелектричних, ємнісних, оптичних, MEMS-, тонкоплівкових, а також спеціалізованих обертових, внутрішньошипіндельних, кільцевих, статичних і рідинних АЕ-давачів. Виявлено відсутність уніфікованих методик порівняння сенсорів у реальних умовах експлуатації, що ускладнює їх обґрунтований вибір для конкретних діагностичних задач. Показано, що сучасні дослідження зосереджені на підвищенні чутливості сенсорів, розширенні робочого частотного діапазону та оптимізації методів обробки сигналів. Обґрунтовано актуальність проведення експериментального порівняння різних типів давачів за параметрами чутливості, частотного відгуку, відношення сигнал/шум і стійкості до зовнішніх впливів. Матеріали роботи формують основу для створення рекомендацій з вибору АЕ-давачів залежно від конструктивних умов, режимів обробки та вимог до точності моніторингу, а також визначають напрями подальших досліджень у галузі сенсорики та акустико-емісійного контролю.

**Ключові слова:** акустична емісія, давачі АЕ, шліфування, контроль процесу.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних системах технічної діагностики все ширше застосовуються методи акустичної емісії, оскільки вони дозволяють проводити неруйнівний контроль матеріалів, виявляти дефекти на ранніх етапах та здійснювати моніторинг технічного стану обладнання в режимі реального часу [1, 2]. Ефективність таких систем значною мірою визначається правильним вибором типу давача акустичної емісії, який має забезпечувати необхідний частотний діапазон, чутливість, завадостійкість та стабільність роботи. На практиці використовуються різні конструкції давачів – резонансні, широкосмугові, п'єзоелектричні, ємнісні та оптичні, кожна з яких має власні переваги та обмеження. Зокрема крім п'єзоелектричних сенсорів, застосовуються лазерні інтерферометри та ємнісні давачі, що дають змогу розширити частотний діапазон вимірювання до десятків мегагерц.

Відсутність узагальненого порівняльного аналізу характеристик цих давачів ускладнює обґрунтований вибір сенсорів для конкретних умов експлуатації. Тому актуальною є задача систематизації інформації про типи давачів АЕ та оцінки їх придатності для різних діагностичних задач.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, де розв'язувались завдання цієї проблеми, виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена стаття.** Останні публікації демонструють стійкий розвиток напрямів, пов'язаних із MEMS- та тонкоплівковими акустико-емісійними сенсорами. У роботах [3, 4] відзначається підвищена увага до мікроелектромеханічних конструкцій (п'єзоелектричних, ємнісних, оптичних), що зумовлено їхньою мініатюрністю, можливістю інтеграції з електронікою, малою масою та перспективами масштабованого виробництва. Дослідження зосереджуються переважно на покращенні чутливості тонкоплівкових елементів та розширенні їхнього робочого температурного діапазону.

Помітна активність спостерігається й у сфері АЕ-моніторингу процесів механічної обробки. Низка робіт [5, 6] уточнює методики використання АЕ-сенсорів для виявлення зношення інструмента, контролю контакту «інструмент – заготовка», ранньої діагностики дефектів і оптимізації режимів різання. Паралельно триває формування підходів до попередньої обробки сигналу – фільтраційних методів, аналізу огинаючої та вейвлет-перетворень, а також визначення оптимальних точок встановлення сенсорів.

Попри значний прогрес, у сучасній літературі фіксуються кілька системних обмежень. По-перше, відсутня уніфікована методика порівняння сенсорів у реальних виробничих умовах:

більшість експериментів виконано на лабораторних стендах, що ускладнює зіставлення характеристик різних типів давачів за єдиними критеріями (SNR, частотний відгук, температурна та вібраційна стабільність). По-друге, мало представлених довготривалих польових досліджень, необхідних для оцінки надійності нових MEMS- і тонкоплівкових рішень у середовищах із забрудненнями, змащувально-охолоджувальними рідинами та ерозійними навантаженнями. По-третє, питання шумів та індустриальних перешкод лишається відкритим: хоча існують окремі алгоритмічні та апаратні пропозиції, у галузі немає узгоджених рекомендацій щодо оптимальних схем попередньої електронної обробки для різних технологічних ситуацій.

**Мета роботи.** Метою статті є проведення систематичного експериментального порівняння різних типів давачів акустичної емісії за уніфікованою методикою з оцінюванням їх чутливості, частотних характеристик, співвідношення сигнал/шум та стійкості до зовнішніх впливів, з подальшим визначенням їх придатності до використання в системах технічної діагностики.

**Постановка завдання.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати особливості принципу дії та конструктивні характеристики поширених типів АЕ-давачів (резонансних, ширококутових, п'єзоелектричних, ємнісних тощо), які визначають їхню чутливість та робочий частотний діапазон.

2. Провести порівняльний аналіз функціональних характеристик давачів АЕ, визначивши сильні та слабкі сторони кожного типу АЕ-давачів.

3. Сформулювати практичні рекомендації щодо вибору давачів для систем технічної діагностики залежно від вимог до точності, частотного діапазону, робочого середовища та умов монтажу.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.**

Давачі акустичної емісії є ключовими елементами систем діагностики та моніторингу технологічних процесів, що супроводжуються виникненням високочастотних коливань. Найбільш поширеним матеріалом для їх виготовлення є п'єзоелектричні кристали, які генерують електричний потенціал у відповідь на деформацію. Найчастіше використовується титанат-цирконат свинцю (PZT), який забезпечує найвищу чутливість серед п'єзоелектричних матеріалів.

Вихідний сигнал давача формується як функція зміщення контактної поверхні та залежить як від часу, так і від просторового положення сенсора у зоні вимірювання. Чутливість давачів АЕ орієнтована переважно на переміщення по нормалі до поверхні встановлення, що диктує вимоги до правильного вибору місця монтажу.

П'єзоелектричний чутливий елемент розміщується у конструктивному корпусі сенсора, де перетворює механічні коливання в електричну напругу. Такий сенсор є пасивним, а його вихід можна описати інтегральним співвідношенням:

$$U(t) = \frac{1}{A} \iint_S u(x, y, t) r(x, y) dx dy, \quad (1)$$

де  $r(x, y)$  – локальна чутливість грані перетворювача;  $S$  – поверхня контакту;  $A$  – ділянка на поверхні  $S$ ;  $u(x, y, t)$  – переміщення на поверхні.

Значення напруги, що генерується такими сенсорами, зазвичай не перевищує декількох мілівольт, тому необхідне підсилення сигналу на 20, 40 або 60 дБ із подальшою фільтрацією та обробкою. Номінал підсилення вибирається залежно від величини амплітуди джерела сигналу.

Під час видалення припуску в процесі механічної обробки у конструктивних елементах верстата виникають механічні коливання, що формують акустичну емісію (АЕ) з високочастотними, переважно ультразвуковими компонентами. Реєстрація цих коливань здійснюється АЕ-давачами, встановленими у технологічно значущих зонах. Отримані сигнали обробляються електронною системою та візуалізуються на локальних або віддалених інтерфейсах, включно з НМІ верстата.

Застосування АЕ-технології забезпечує контроль процесів механічної обробки, зокрема шліфування, дозволяючи оцінювати якість поверхні, зношення інструмента та технічний стан обладнання. Використання статичних та обертових давачів (у тому числі з безконтактною передачею сигналу) забезпечує високе відношення сигнал/шум і фіксацію мінімальних змін у процесі, що підвищує ефективність та знижує експлуатаційні витрати.

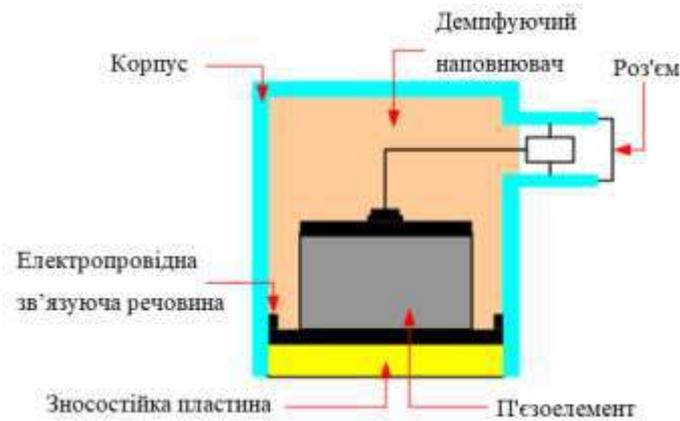


Рисунок 1 – Схема типової конструкції датчика АЕ [6]

Вібрації у зоні контакту інструмента із заготовкою супроводжуються короточасними пластичними деформаціями матеріалу, які генерують ультразвукові хвилі. Ці хвилі реєструються п'єзоелектричними датчиками за зміною електричного потенціалу, індукованого деформаціями чутливого елемента.

У шліфувальних верстатах АЕ дозволяє аналізувати шум, який виникає під час взаємодії шліфувального круга з деталлю або правлячим інструментом, що забезпечує контроль як процесу шліфування, так і правки. Ультразвукові хвилі, поширюючись конструкцією верстата, зазнають змін амплітуди й частоти, що дає можливість оцінювати стан процесу та здійснювати автоматичні коригувальні дії.

Ефективність системи АЕ-контролю визначається оптимальним розташуванням датчиків – максимально близько до зони різання. Зміни параметрів АЕ сигналізують про варіації сили різання, ступінь зношення круга або наближення до граничного стану інструмента, що дозволяє адаптувати режими обробки. АЕ також застосовується для скорочення циклу шліфування завдяки точному визначенню моменту контакту круга з деталлю та використанню огинаючої сигналу для спрощення аналізу. Крім того, система може виконувати функції контролю зіткнень, забезпечуючи миттєве зупинення верстата для запобігання пошкодженням. Окремий різновид – обертовий датчик (М-датчик) АЕ (рисунок 2). Його роторна частина встановлюється на шпинделі або фланці шліфувального круга чи правлячого диска, тоді як статор закріплюється на кожусі або спеціальному тримачі. Така конструкція дозволяє здійснювати вимірювання безпосередньо в обертових вузлах верстата та забезпечує високий рівень чутливості та інформативності сигналу.

Датчик акустичної емісії може встановлюватися у таких конструктивних зонах: на шпинделі шліфувального круга; на опорному фланці шліфувального круга.

Функціональні можливості датчика включають: моніторинг процесу правки шліфувального круга; моніторинг процесу шліфування.

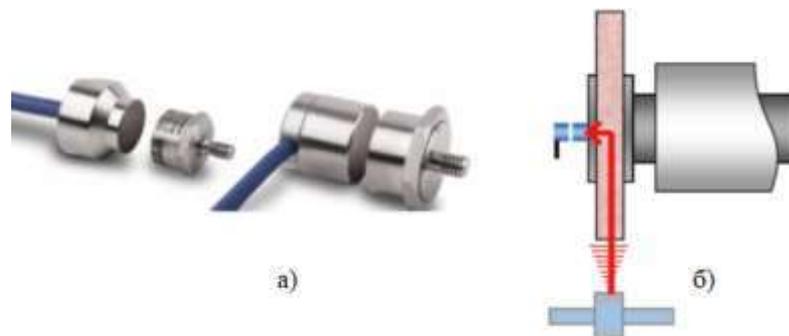


Рисунок 2 – М-датчик: а) загальний вигляд; б) схема розташування на верстаті

Користувачські переваги такого типу датчиків полягають у наступному: спрощена процедура монтажу; високе відношення сигнал/шум, оскільки датчик розташовується максимально близько до джерела АЕ – у зоні контакту інструмент–деталь; уникнення втрат сигналу, які виникають при передачі через механічні вузли (підшипники, корпус шпинделя);

низька чутливість до вібрацій шпинделя — сучасні М-давачі мають фільтрацію паразитних коливань; підтримка високих частот АЕ (до 1 МГц і вище), що робить їх придатними для діагностики мікротріщин та початку контакту при правці.

Технічні особливості: робочий частотний діапазон: 150–800 кГц, інколи до 1,2 МГц; динамічний діапазон – високий, дозволяє виявляти як слабкі, так і інтенсивні АЕ-імпульси; температурна стійкість: до 80–120 °С в зоні шпинделя; здебільшого потребує калібрування для конкретної конструкції верстата.

Ще один різновид це мікродавач / внутрішній давач шпинделя. Конструктивно поворотна частина давача, як показано на рисунку 3, складається з п'єзоелектричного чутливого елемента та електронного модуля передачі сигналу. Геометричні параметри давача можуть бути адаптовані відповідно до специфічних вимог конкретного застосування. Давач інтегрується всередину шпинделя шліфувального круга або шпинделя правлячого інструмента, що забезпечує високий рівень чутливості та інформативності вимірювань завдяки безпосередньому розташуванню у зоні генерації акустичних коливань.

Місця встановлення давача можуть включати: інтеграцію у шпиндель заготовки; монтаж у шпиндель правлячого інструменту; розміщення у шпинделі шліфувального круга.

Функціональні можливості давача передбачають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування.

Користувацькі переваги: розташування давача у безпосередній близькості до зони різання та значна площа чутливого елемента забезпечують високий рівень інформативності та якість реєстрованого сигналу; стабільність роботи на високих обертах та в умовах підвищених вібрацій; мінімальна залежність від конструктивних особливостей корпусу верстата, на відміну від зовнішніх або статичних давачів.

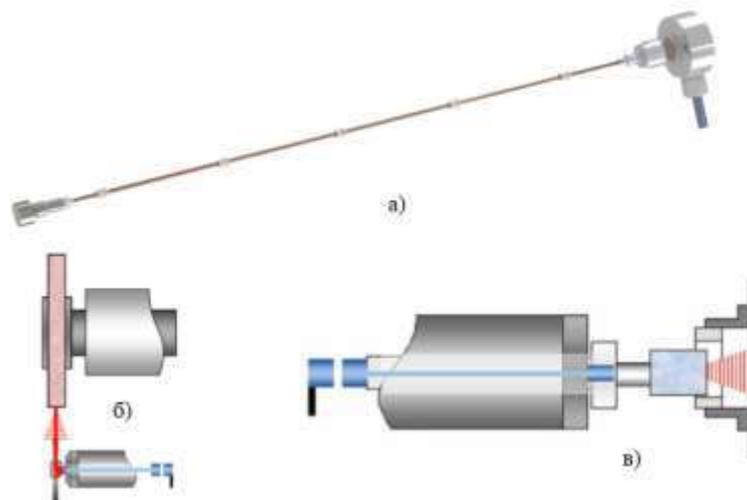


Рисунок 3 – Мікродавач/внутрішній давач шпинделя: а) вигляд загальний, б) схема місця давача у шпинделі інструмента, в) схема розташування давача у шпинделі шліфкруга

Наступний різновид це кільцевий давач. Конструктивно нерухома та обертова частини давача, як зображено на рисунку 4, виконані у формі кільця та доступні в широкому діапазоні типорозмірів і конфігурацій. Це дає змогу здійснювати зовнішнє встановлення на різні типи шліфувальних шпинделів. Монтаж давача може здійснюватися на фланці шліфувального круга, безпосередньо на шпинделі або на торцевій опорі заготовки, що забезпечує ефективне вилучення сигналів акустичної емісії у критичних конструктивних зонах.

Можливі варіанти встановлення давача включають: монтаж у шпинделі заготовки; інтеграцію у шпиндель правлячого інструменту; розміщення у шпинделі шліфувального круга; установлення на опорному фланці шліфувального круга.

Функціональні можливості давача передбачають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування; основний робочий діапазон – 50 кГц ... 800 кГц; резонансна частота (у залежності від моделі) – 150...400 кГц; типові значення чутливості – 50 ... 80 дБ (реф. 1 В/м/с); співвідношення сигнал/шум (SNR) – 40...60 дБ; відхилення чутливості по окружності: не більше  $\pm 3$  дБ.

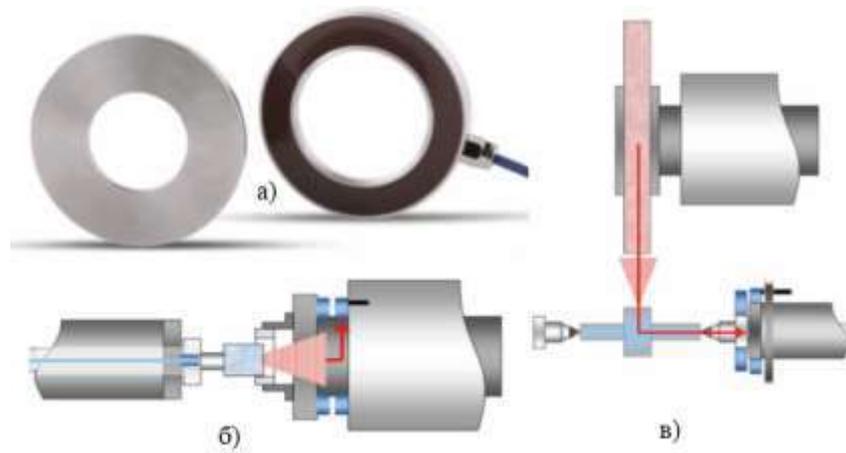


Рисунок 4 – Кільцеві-давачі: а) – загальний вигляд давача; б) – схема розташування давача на внутрішньошліфувальному верстаті; в) – схема розташування давача на зовнішньошліфувальному верстаті

Основні переваги для кінцевого користувача: безпосередній контакт із правлячим або шліфувальним інструментом забезпечує максимальну якість та інформативність сигналу; давач має стаціонарне виконання, що підвищує стабільність вимірювань.

Статичні давачі (S-давачі) ще один різновид АЕ давачів, конструкція яких наведена на рисунку 5, характеризуються компактністю та можливістю передавання сигналу через посадочну поверхню. Такі давачі встановлюються на опорі бабки, на поверхні деталі, шліфувального круга або правлячого інструмента, забезпечуючи ефективне знімання сигналів акустичної емісії без необхідності рухомих елементів.



Рисунок 5 – Загальний вигляд кільцевих-давачів: а) мікро-S-давача; б) міні-S-давача; в) міні-магнітного давача; г) S-давача; д) SF-давача; е) схема розташування давача на верстаті

Давач може бути встановлений у таких позиціях: на бабці шпинделя заготовки; на бабці шпинделя шліфувального круга; на бабці шпинделя правлячого інструменту.

Функціональні можливості давача включають: контроль параметрів процесу правки; моніторинг процесу шліфування; робочий частотний діапазон – 50 кГц ... 1000 кГц; типові резонансні частоти – 150–300 кГц; смуга пропускання: широкосмуговий або вузькосмуговий варіант; чутливість – 45 ... 75 дБ (відносно 1 В/м/с); співвідношення сигнал/шум (SNR) – 35–55 дБ; нерівномірність чутливості: не більше  $\pm 2$  ...  $\pm 3$  дБ.

Основні експлуатаційні переваги: спрощена процедура монтажу; отримання сигналів високої якості завдяки сприятливим умовам встановлення.

Наступний різновид це рідинний акустичний давач є ультразвуковим сенсором акустичної емісії з передаванням сигналу по кабельній лінії та поверхневим поширенням хвиль (рисунок 6). Знімання інформації здійснюється через шар змащувально-охолоджувальної рідини, що циркулює у верстаті, завдяки чому забезпечується стабільний контакт та ефективна акустична передача.

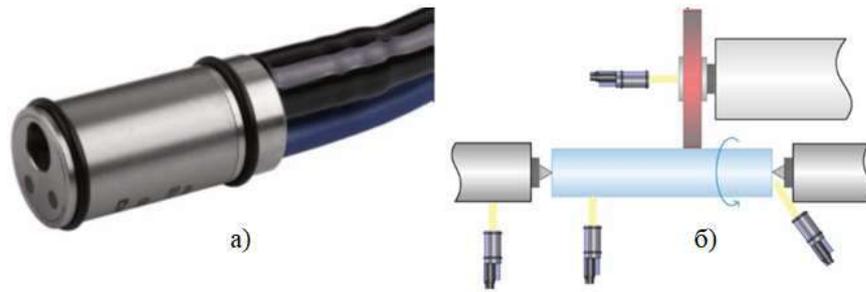


Рисунок 6 – Рідинний акустичний давач:

а) – загальний вигляд давача, б) – схема розташування давача на верстаті

Додаткові функціональні можливості давача: контроль процесу правки як на нерухомих, так і на обертових поверхнях; моніторинг процесу шліфування для статичних і динамічних зон контакту; робочий діапазон частот – 20 кГц ... 600 кГц; пікова чутливість – 100...300 кГц; смуга пропускання ( $\pm 6$  дБ) – 50...400 кГц; чутливість у рідині – 60...95 дБ; SNR – 45...70 дБ (високий за рахунок рідинного узгодження); мінімальна амплітуда сигналу – 1...5 мВ.

Можливі канали отримання сигналу: від заготовки; від інструмента (ріжучого, правлячого або технологічної оснастки); від бабки шпинделя (заготовки, ріжучого чи правлячого інструменту); від пристрою базування та закріплення заготовки.

Переваги для користувача: проста установка і можливість швидкої інтеграції в існуюче обладнання; висока стійкість до електромагнітних завад, що генеруються верстатом; сумісність із більшістю систем обробки сигналів АЕ без потреби у додатковому попередньому підсиленні.

Акустична емісія передається через потік змащувально-охолоджувальної рідини до рідинного АЕ-давача. Завдяки електричній та акустичній ізоляції давача від конструкції верстата рівень фонового шуму значною мірою знижується, що забезпечує підвищену чистоту та стабільність отримуваних сигналів.

Аналіз функціональних характеристик давачів АЕ наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика давачів АЕ

Тип Критерій давача	Обертовий (М-давач)	Мікродавач (внутр. шпинделя)	Кільцевий давач	Статичний (S-давач)	Рідинний АЕ-давач
Спосіб контакту	безпосередній / через фланець; безконтактна передача сигналу	безпосередній / внутрішній контакт; безконтактна передача	контакт через кільцеву поверхню	контакт через посадочну поверхню (паста/гвинт)	акустичне узгодження через рідину
Частотний діапазон (типовий)	150 кГц – 1 МГц	150 кГц – 1 МГц	50 кГц – 800 кГц	50 кГц – 1000 кГц	20 кГц – 600 кГц
Чутливість / SNR	дуже висока (від близькості до джерела)	найвища (мінімальна затухання)	висока (велика площа контакту)	середня/висока (залежить від монтажу)	дуже висока у рідині (найкраще узгодження)
Темп. робочий діапазон	0...+80°C (спецмоделі до +120 °C)	0...+80 (120)°C (залежить від внутр. електроніки)	0...+80 °C	-10...+70 °C	-10...+90(120)°C (залежить від рідини)

**Висновки.** Узагальнення функціональних можливостей та експлуатаційних переваг різних типів АЕ-давачів дозволяє сформулювати комплексні рекомендації щодо їх застосування залежно від задачі контролю: виявлення контакту в шліфуванні, моніторинг правки, діагностика зношення інструмента чи контроль мікротріщин.

Якщо пріоритет – максимальна інформативність і SNR, найкращий вибір – мікродавач / внутрішній давач шпинделя або обертовий М-давач. Ці рішення дають мінімальні втрати сигналу, але вимагають пристосування конструкції шпинделя й мають вищу вартість. Якщо потрібна універсальна, недорога і швидкоінтегрована опція, доцільно використовувати стаціонарні S-давачі. Вони прості в монтажі, хороші для модернізації існуючих верстатів, але можуть поступатися у SNR при слабких джерелах АЕ. Кільцевий давач оптимальний для завдань, де важлива рівномірність прийому по периметру шпинделя – наприклад, для контролю правки, коли джерело АЕ може переміщуватися по окружності. Рідинний АЕ-давач рекомендується у середовищах із ЗОР або сильним забрудненням поверхні, або коли потрібно контролювати АЕ через шар рідини (передача через ЗОР, трубопроводи, герметичні стінки). Він забезпечує дуже ефективне акустичне узгодження, але потребує організації герметичного контакту та контролю властивостей рідини. Виконана систематизація характеристик підтверджує доцільність використання різних сенсорних рішень у комбінації з оптимально налаштованою системою передпідсилення та фільтрації.

### Інформаційні джерела

1. Мороз С. А., Петрук І. В., Петрук О. В. Акустична емісія як відображення мікродинамічних процесів під час шліфування // "Перспективні технології та прилади". Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. С. 149–153.
2. Чалий В.Д., Кузьмич А.І. Моніторинг процесу шліфування за допомогою акустичної емісії. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (23-25 жовтня 2024 р.). Збірник тез. Луцьк. ЛНТУ, 2024. С. 113-114.
3. MEMS Acoustic Sensors: Charting the Path from Research to Real-World Applications [https://www.mdpi.com/2072-666X/16/1/43?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2072-666X/16/1/43?utm_source=chatgpt.com)
4. Tool Wear Monitoring in Milling Processes Based on Time-Frequency Analysis of Acoustic Emission [https://www.scientific.net/AMM.141.574?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scientific.net/AMM.141.574?utm_source=chatgpt.com)
5. Diamond Grinding Wheel Condition Monitoring Based on Acoustic Emission Signals [https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1054?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1054?utm_source=chatgpt.com)
6. Tool Condition Monitoring Methods Applicable in the Metalworking Process [https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-023-09979-w?utm\\_source=chatgpt.com](https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-023-09979-w?utm_source=chatgpt.com)

**Chaly V., Moroz S., Lyshuk V., Prystupa S., Yevsyuk M.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

### COMPARATIVE STUDY OF TYPES OF ACOUSTIC EMISSION SENSORS FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

*The paper presents a systematic review of modern types of acoustic emission (AE) sensors used in systems for technical diagnostics and monitoring of machining processes. The principles of operation, design features and metrological characteristics of piezoelectric, capacitive, optical, MEMS, thin-film, as well as specialized rotating, intraspindle, ring, static and liquid AE sensors are analyzed. The lack of unified methods for comparing sensors in real operating conditions is revealed, which complicates their informed choice for specific diagnostic tasks. It is shown that modern research is focused on increasing the sensitivity of sensors, expanding the operating frequency range and optimizing signal processing methods. The relevance of conducting an experimental comparison of different types of sensors in terms of sensitivity, frequency response, signal/noise ratio and resistance to external influences is substantiated. The materials of the work form the basis for creating recommendations for the selection of AE sensors depending on the design conditions, processing modes and requirements for monitoring accuracy, and also determine the directions of further research in the field of sensors and acoustic emission control.*

**Keywords:** acoustic emission, AE sensors, grinding, process control.

Дата першого надходження  
статті до видання  
19.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
16.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р

УДК 519.8: 004.6: 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-28

**Шишковський С. О., Гуменюк Л. О.**

Луцький національний технічний університет

## МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ ВОЛОНТЕРІВ ПІД ЧАС КАТАСТРОФ

*У роботі проведено аналіз існуючих методів та моделей, що застосовуються для розподілу та маршрутизації волонтерів під час ліквідації наслідків катастроф. Огляд літератури підтвердив важливість волонтерів як ресурсу для підсилення спроможностей офіційних служб реагування та показав логістичні виклики, пов'язані з їх ефективною інтеграцією, особливо у випадку спонтанних волонтерів. Управління волонтерськими ресурсами базується на різних підходах, що враховують як ефективність, так і людський фактор. Аналіз показав, що сучасні моделі прагнуть враховувати широкий спектр факторів, включаючи компетентності та вподобання волонтерів, пріоритетність потреб постраждалих, специфіку завдань, часові та геопросторові обмеження, логістику, динамічність ситуації, невизначеність та ризики. Огляд методів та моделей демонструє інтерес до розробки інструментів для оптимізації управління волонтерами. Виявлено тенденцію до інтеграції різних підходів, врахування невизначеності та динаміку кризових ситуацій. Результати цього аналізу створюють теоретичну основу для розробки алгоритмів та функціоналу автоматизованої системи розподілу та маршрутизації волонтерів.*

**Ключові слова:** маршрутизація волонтерів, моделювання, оптимізація, візуалізація.

**Постановка проблеми.** Управління наслідками катастроф та надання гуманітарної допомоги є складним і багатогранним завданням, у якому волонтери відіграють надзвичайно важливу роль. Їхня здатність швидко мобілізуватися та надавати різноманітну підтримку, від спеціалізованої допомоги до виконання простих завдань, робить їх безцінним ресурсом у кризових ситуаціях. Волонтери здатні забезпечити значне збільшення потенціалу реагування, яке не завжди можуть забезпечити лише офіційні служби. Вони можуть виконувати широкий спектр завдань, полегшуючи навантаження на персонал служб надзвичайних ситуацій та дозволяючи їм зосередитися на більш спеціалізованих видах діяльності [1].

У зв'язку зі зростаючою частотою та інтенсивністю масштабних катастроф, зростає і науковий інтерес до оптимізації управління волонтерами. Більша кількість катастроф призводить до більшої потреби в ефективному реагуванні, що, у свою чергу, підкреслює велику роль волонтерів.

Хоча волонтери визнаються цінним ресурсом, їхня ефективна інтеграція створює значні логістичні проблеми, які іноді називають «катастрофою всередині катастрофи» [2].

Волонтери можуть бути спонтанними або зареєстрованими. Спонтанні волонтери, як правило, допомагають без офіційної реєстрації, діючи ситуативно в кризових ситуаціях. Хоча вони можуть не мати офіційного статусу, їхня допомога часто є надзвичайно цінною. З іншого боку, зареєстровані волонтери оформлюються через офіційні організації (благодійні фонди, волонтерські центри), що дає їм доступ до інструкцій, ресурсів та підтримки.

Основні відмінності між спонтанними та зареєстрованими волонтерами полягають у їхній організації, підтримці та відповідальності. Зареєстровані волонтери діють у системному порядку, що дозволяє ефективно інтегрувати їх у робочі процеси, тоді як спонтанні волонтери зазвичай залучаються ситуативно, залежно від нагальної потреби.

Офіційно зареєстровані волонтери мають доступ до необхідних ресурсів, таких як харчування, засоби захисту та інші матеріали, що підвищує їхню ефективність. Спонтанні волонтери ж часто не мають такої підтримки. Крім того, зареєстровані волонтери мають чітко визначені обов'язки та проходять інструктаж, що дозволяє їм діяти більш злагоджено і в рамках організованих заходів, в той час як спонтанні волонтери не завжди мають таку підготовку.

Зростання техногенних аварій через зміни клімату, старіння інфраструктури та недостатнє дотримання стандартів безпеки продемонструвало високий рівень уразливості сучасних інфраструктур та важливість ефективного реагування на надзвичайні ситуації. У цьому контексті особливо актуальним стає питання організації системи розподілу та маршрутизації волонтерів під час катастроф NaTech (техногенно-природних катастроф).

**Метою роботи** є аналіз існуючих методів та моделей, що застосовуються для розподілу та маршрутизації волонтерів під час ліквідації наслідків катастроф для подальшої розробки автоматизованої системи розподілу та маршрутизації волонтерів, здатної ефективно функціонувати в умовах катастроф типу *NaTech*, шляхом поєднання алгоритмічних, просторових і логістичних рішень для підтримки оперативного реагування на надзвичайні ситуації у міському середовищі.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для оптимізації розподілу та маршрутизації волонтерів під час катастроф використовується широкий спектр моделей та методів. Основні категорії включають:

- 1) оптимізаційні моделі,
- 2) моделі черг,
- 3) агентно-орієнтовані симуляції (АОС),
- 4) моделі та методи прийняття рішень.

1. Оптимізаційні моделі спрямовані на пошук найкращого можливого рішення для розподілу волонтерів з урахуванням певних обмежень та цілей. Оптимізаційні моделі можна поділити на:

- моделі лінійного та цілочисельного програмування,
- багатокритеріальні моделі оптимізації,
- моделі робастної оптимізації.

Моделювання задач призначення волонтерів на завдання під час ліквідації наслідків катастроф часто базується на лінійному та цілочисельному програмуванні, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів за визначеними критеріями.

У [3] запропоновано модель для підвищення продуктивності та утримання волонтерів, враховуючи змінні потреби постраждалих і розвиток навичок волонтерів. Автори [4] розробили модель цілочисельного програмування для оптимального розподілу завдань між волонтерами та працівниками неприбуткових організацій, акцентуючи на задоволеності волонтерів, що є критичним для їхнього утримання. В роботі [5] розроблено модель для призначення рятувальників в різні райони катастроф з урахуванням їхніх кваліфікацій та уподобань, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси в різних зонах. Ряд інших моделей розглядають оптимізацію початкового розподілу як професійних рятувальників, так і волонтерів під час катастроф, що дозволяє забезпечити ефективне реагування на надзвичайні ситуації. Також пропонується зосередитися на попередньому розподілі завдань для мінімізації часу реагування, що є критично важливим у кризових умовах [5-6].

Перевага цих моделей полягає в здатності знаходити оптимальні рішення для чітко визначених проблем. Однак вони можуть бути складними для розв'язання в масштабних ситуаціях і не завжди враховують динаміку змін.

У [7] запропоновано багатокритеріальну модель оптимізації для управління волонтерами в гуманітарних організаціях, яка враховує переваги волонтерів та вимоги до завдань, забезпечуючи баланс між ефективністю виконання завдань і збереженням волонтерів. Для підвищення ефективності застосовано нечітку логіку (*fuzzy logic*). Модель враховує компроміси між потенційно конфліктуючими цілями, такими як ефективність виконання завдань і задоволеність волонтерів. Автори [1] розробили модель багатоцільової оптимізації для координації волонтерів у динамічному й невизначеному середовищі, спрямовану на одночасну оптимізацію кількох цілей в умовах катастроф. В [8] автори використали багатокритеріальну оптимізацію з нечіткими системами виводу для покращення управління волонтерами після катастроф, акцентуючи на обробці невизначеності через нечітку логіку.

Розробка таких моделей демонструє, що реагування на катастрофи передбачає збалансування різних важливих факторів, при цьому враховується мінімізація незадоволених потреб, максимізація задоволеності волонтерів та забезпечення справедливості. Використання нечіткої логіки підкреслює наявність невизначеності в управлінні волонтерами, зокрема в контексті суб'єктивних переваг та неточних вимог до завдань.

Модель на основі стійкої оптимізації [9] призначена для динамічного управління волонтерами під час гуманітарних криз, мінімізуючи невиконані завдання з урахуванням переваг та навичок волонтерів в умовах змін. Ця модель явно враховувала невизначеність у вимогах до завдань, використовуючи підхід робастної оптимізації.

В роботі [10] автори застосували теорію Демпстера–Шафера для оптимального призначення рятувальників за невизначеності. Це дослідження використовувало теорію Демпстера-Шафера для обробки невизначеності при призначенні рятувальників.

Катастрофи завжди пов'язані з невизначеністю – змінюється попит на допомогу та кількість доступних волонтерів. Робастна оптимізація допомагає знайти рішення, які залишаються ефективними навіть у складних і нестабільних умовах.

2. Моделі черг використовуються для аналізу систем, де об'єкти (у цьому випадку волонтери) прибувають випадковим чином і потребують обслуговування (призначення завдань).

Автори [11] змоделивали ситуацію, коли спонтанні волонтери приходять у різний час і в різній кількості, як багатоканальну систему черг. У такій системі волонтери прибувають випадково, можуть не дочекатися призначення і піти (тобто «відмовитися»). Для оцінки варіантів розподілу вони використали марковські процеси прийняття рішень – математичний інструмент, який дозволяє вибрати найкращу стратегію, враховуючи випадкові зміни у середовищі. Модель дозволяє зрозуміти, як зміна політики розподілу (наприклад, кого призначати першим) впливає на загальну ефективність.

В роботі [12] розроблено схожу модель черг, де також застосовуються марковські процеси, але додатково використовуються комп'ютерні симуляції. Це дозволило протестувати різні стратегії у змодельованих умовах катастроф, де ситуація постійно змінюється. Основна мета – знайти способи швидко приймати, перевіряти та ефективно призначати спонтанних волонтерів на відповідні завдання.

Автори [13] також використали модель черг, орієнтовану на роботу в умовах невизначеності. Вони застосували марковські моделі для вирішення проблем призначення волонтерів, коли точно невідомо, скільки волонтерів надійде і які завдання будуть доступні. Це дозволило аналізувати ситуації, коли є обмежені ресурси та необхідно приймати рішення на основі неповної інформації.

Загалом, усі три дослідження трактують управління спонтанними волонтерами як задачу потоків: волонтери надходять у систему, можливо чекають, і врешті – обслуговуються (призначаються на завдання). Теорія черг дозволяє оцінювати ключові показники – тривалість очікування, довжину черги, завантаженість координаторів.

3. Агентно-орієнтовані симуляції (АОС) використовуються для моделювання поведінки окремих волонтерів і їхньої взаємодії в умовах катастроф. У [14] застосували АОС для оцінки евристичних стратегій призначення спонтанних волонтерів у центрах допомоги з метою зменшення часу перебування як волонтерів, так і отримувачів допомоги. Автори [15] використали АОС для аналізу управління впливом волонтерів і формування стратегічних рішень у режимі невизначеності. Автори [16] створили децентралізовану модель рекомендацій завдань для волонтерів на основі їхніх переваг, що відповідає принципам АОС.

Використання таких симуляцій дозволяє враховувати індивідуальні особливості, мотивації та поведінкові правила волонтерів. Це розширює розуміння не лише механічного розподілу завдань, як у класичних моделях, а й соціальної динаміки участі у волонтерстві. АОС дає змогу дослідити причини залучення волонтерів, особливості їхніх рішень, а також наслідки різних управлінських стратегій, що робить цей підхід особливо цінним для покращення комунікації, залучення та утримання волонтерів у кризових умовах.

4. Моделі та методи прийняття рішень включають різні підходи, які допомагають особам, що приймають рішення, ефективно розподіляти та спрямовувати волонтерів.

Евристичний підхід. Знання того, що прості евристики можуть працювати порівняно з складними оптимальними стратегіями, має важливі практичні наслідки для управління надзвичайними ситуаціями. Це свідчить про те, що організації з обмеженими ресурсами можуть не завжди потребувати впровадження складних моделей для досягнення хороших результатів. Хоча оптимізаційні моделі можуть забезпечити теоретично оптимальні рішення, вони часто вимагають значних даних та обчислювальних ресурсів. Той факт, що прості правила можуть бути майже такими ж ефективними, робить управління волонтерами більш доступним та практичним для організацій з обмеженими можливостями [13, 17].

Двосторонні моделі відповідності. Двосторонні моделі відповідності враховують переваги як волонтерів, так і координаторів завдань, щоб забезпечити ефективне та взаємовигідне призначення. Вони дозволяють працювати навіть за неповної або неточної інформації.

Окремі підходи також враховують емоційні аспекти, як-от радість і розчарування волонтерів, або поєднують сучасні методи оптимізації (наприклад, DEA, диференціальну

еволюцію, EBRB) для підвищення точності призначень. Загалом цей напрямок відображає зсув до більш людоцентричного управління волонтерами – з урахуванням їх мотивацій, очікувань і задоволеності [18-19].

**Викладення основного матеріалу.** Різноманітні моделі [1-19], що застосовуються в контексті розподілу та маршрутизації волонтерів, характеризуються комплексним врахуванням широкого спектра факторів. Зокрема, моделі систематично враховують компетентності та кваліфікації волонтерів з метою оптимізації виконання завдань та підвищення ймовірності успішного досягнення поставлених цілей, що також сприяє підвищенню рівня задоволеності та утримання волонтерського корпусу. Крім того, важливим елементом є врахування індивідуальних умінь та часової доступності волонтерів для забезпечення високого рівня мотивації та залученості, прагнучи до узгодження особистих схильностей з актуальними потребами.

Центральним аспектом багатьох моделей є пріоритетність потреб постраждалого населення та специфіка завдань, орієнтуючись на задоволення найнагальніших потреб осіб, які постраждали внаслідок кризової ситуації, шляхом пріоритетизації завдань на основі оцінки їхньої критичності.

Управління волонтерськими ресурсами часто відбувається в умовах часових обмежень, що зумовлює необхідність їхнього врахування в моделях, а динамічний характер катастроф вимагає від моделей здатності до адаптації у відповідь на зміни в умовах та потребах.

Моделювання процесів розподілу волонтерів повинно враховувати притаманну кризовим ситуаціям невизначеність щодо кількості доступних волонтерів, їхніх компетенцій та еволюціонуючих потреб, а також розглядати потенційні ризики, пов'язані з виконанням завдань у зоні катастрофи.

Оптимізація розподілу та маршрутизації волонтерів передбачає аналіз геопросторових характеристик та логістики переміщення, включаючи географічне розташування волонтерів, місць виконання завдань та транспортної інфраструктури, де мінімізація часу на пересування є критично важливим фактором.

Спонтанні волонтери є учасниками реагування на надзвичайні ситуації без попередньої підготовки чи організаційної приналежності. Проте їхня непередбачуваність щодо прибуття, різноманітність навичок та відсутність попередньої координації створюють значні управлінські виклики. Це потребує спеціалізованих моделей розподілу та маршрутизації для ефективного використання цього ресурсу.

Для оптимізації процесу призначення волонтерів у ситуаціях обмежених ресурсів та високої динаміки потреб використовуються моделі черг, тоді як агентно-орієнтоване моделювання дозволяє імітувати поведінку волонтерів у динамічному середовищі для тестування різних стратегій управління. Моделі рекомендацій надають волонтерам можливість самостійно обирати завдання відповідно до їхніх навичок та інтересів, що сприяє підвищенню ефективності та мотивації. У складних умовах, де необхідно балансувати між різними потребами організацій та можливостями волонтерів у змінному середовищі, застосовується багатоцільова оптимізація.

Існують різні стратегії для залучення та призначення завдань спонтанним волонтерам.

Централізоване адміністрування передбачає створення єдиної системи координації для зменшення хаосу та затримок у розподілі завдань. Волонтерські центри прийому забезпечують місце для реєстрації, навчання та інструктажу, що дозволяє ефективніше зіставляти навички волонтерів з наявними потребами.

Використання технологій, таких як SMS-розсилки, мобільні додатки та онлайн-платформи, спрощує комунікацію та процес розподілу завдань.

В умовах обмеженого часу можуть бути ефективними евристичні методи розподілу, що базуються на простих правилах, наприклад, призначення найближчого доступного волонтера. Крім того, гнучкі рекомендаційні системи, які пропонують завдання замість прямого призначення, сприяють самостійності волонтерів та покращують їхню мотивацію.

Реагування на катастрофи є не статичним процесом, а розвивається з часом, оскільки потреби змінюються, а наявність волонтерів коливається. Це зумовлює необхідність використання моделей, які можуть адаптуватися до цих мінливих обставин.

Динамічне управління волонтерами передбачає застосування методів, що враховують змінність потреб і характеристик учасників процесу. Розроблені моделі оптимізації дозволяють

ефективно спрямовувати волонтерів на завдання, враховуючи їхні навички та ймовірність виконання завдань.

У непередбачуваних умовах надзвичайних ситуацій особливо важливо мати рішення, стійкі до невизначеності. Прогнозування потреб у волонтерах ґрунтується на аналізі історичних даних із застосуванням машинного навчання. Такі підходи дозволяють заздалегідь оцінити обсяги необхідної допомоги, спираючись на досвід попередніх катастроф, що сприяє більш ефективній підготовці та розподілу ресурсів.

Адаптація до змін у ході реагування включає оновлення розкладів, перепризначення завдань і повторну оцінку ресурсів. Стійкі моделі забезпечують збереження ефективності навіть у разі суттєвих відхилень від початкових умов, дозволяючи системі реагування залишатися гнучкою та стійкою.

Узагальнюючи, сучасні підходи до управління волонтерами в умовах катастроф базуються на трьох ключових принципах: динамічності, прогнозуванні та стійкості. Це забезпечує ефективність реагування навіть в умовах високої невизначеності та обмежених ресурсів.

**Висновки.** Проведено аналіз існуючих методів та моделей, що застосовуються для розподілу та маршрутизації волонтерів під час ліквідації наслідків катастроф. Огляд літератури підтвердив важливість волонтерів як ресурсу для підсилення спроможностей офіційних служб реагування та показав логістичні виклики, пов'язані з їх ефективною інтеграцією, особливо у випадку спонтанних волонтерів. Управління волонтерськими ресурсами базується на різних підходах, що враховують як ефективність, так і людський фактор. Аналіз показав, що сучасні моделі прагнуть враховувати широкий спектр факторів, включаючи компетентності та вподобання волонтерів, пріоритетність потреб постраждалих, специфіку завдань, часові та геопросторові обмеження, логістику, динамічність ситуації, невизначеність та ризики. Огляд методів та моделей демонструє інтерес до розробки інструментів для оптимізації управління волонтерами. Виявлено тенденцію до інтеграції різних підходів, врахування невизначеності та динаміку кризових ситуацій. Результати цього аналізу створюють теоретичну основу для розробки алгоритмів та функціоналу автоматизованої системи розподілу та маршрутизації волонтерів.

#### Інформаційні джерела

1. Sperling M., Schryen G. Decision support for disaster relief: coordinating spontaneous volunteers. *Eur J Oper Res.* 2022. № 299 (2). P. 690-705.
2. Wang Q., Reed A., Nie X. Joint initial dispatching of official responders and registered volunteers during catastrophic mass-casualty incidents. *Transport Res Part E: Log Transport Rev.* 2022. № 159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102648> (дата звернення: 10.04.2025).
3. Improving volunteer productivity and retention during humanitarian relief efforts. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261803944\\_Improving\\_Volunteer\\_Productivity\\_and\\_Retention\\_during\\_Humanitarian\\_Relief\\_Efforts](https://www.researchgate.net/publication/261803944_Improving_Volunteer_Productivity_and_Retention_during_Humanitarian_Relief_Efforts) (дата звернення: 17.08.2025).
4. Optimization of volunteer task assignments to improve volunteer retention and nonprofit organizational performance. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038012122001872> (дата звернення: 17.08.2025).
5. A model for assignment of rescuers considering multiple disaster areas. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420919300603?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
6. Modeling uncertain task compliance in dispatch of volunteers to out-of-hospital cardiac arrest patients. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221004198?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
7. An optimization model for volunteer assignments in humanitarian organizations. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038012112000353?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
8. Rabiei P., Arias-Aranda D., Stantchev V. Introducing a novel multi-objective optimization model for volunteer assignment in the post-disaster phase: combining fuzzy inference systems with nsga-ii and nrga. *Expert Syst Appl.* 2023. № 226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120142> (дата звернення: 10.04.2025).
9. A robust optimization approach to volunteer management in humanitarian crises. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527315000523?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).

10. Fei L., Wang Y. An optimization model for rescuer assignments under an uncertain environment by using Dempster–Shafer theory. *KB Syst.* 2022. № 255. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109680> (дата звернення: 10.04.2025).
11. The optimal assignment of spontaneous volunteers. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/s41274-017-0219-2> (дата звернення: 17.08.2025).
12. Optimal control of parallel queues for managing volunteer convergence. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1111/poms.13224> (дата звернення: 17.08.2025).
13. Assigning spontaneous volunteers to relief efforts under uncertainty in task demand and volunteer availability. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305048319300611?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
14. Managing volunteer convergence at disaster relief centers. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527319301999?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
15. Paret K., Rodriguez S. A., Mayorga M. E., Velotti L., Lodree E. J. Agent-based simulation of spontaneous volunteer convergence to improve disaster planning. *Nat Hazards Rev.* 2023. Vol. 24, No. 2. URL: <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1659> (дата звернення: 10.04.2025).
16. Schmidt A., Albert L. Task recommendations for self-assigning spontaneous volunteers. *Comput Ind Eng.* 2022. № 163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107798> (дата звернення: 10.04.2025).
17. Modeling uncertain task compliance in dispatch of volunteers to out-of-hospital cardiac arrest patients. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221004198?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
18. Two-sided matching model for assigning volunteer teams to relief tasks in the absence of sufficient information. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950705121007577?via%3Dihub> (дата звернення: 17.08.2025).
19. Volunteer multi-person multi-task optimization dispatch method considering two-sided matching. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-022-06784-8> (дата звернення: 17.08.2025).

**Shishkovsky S., Gumeniuk L.**

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

## METHODS AND MODELS FOR DISTRIBUTING AND ROUTING VOLUNTEERS DURING DISASTERS

*The paper analyzes existing methods and models used for the distribution and routing of volunteers during disaster response. A review of the literature confirmed the importance of volunteers as a resource for strengthening the capabilities of official response services and highlighted the logistical challenges associated with their effective integration, especially in the case of spontaneous volunteers. Volunteer resource management is based on various approaches that take into account both efficiency and the human factor. The analysis showed that modern models seek to take into account a wide range of factors, including the competencies and preferences of volunteers, the priority of victims' needs, the specifics of tasks, time and geospatial constraints, logistics, the dynamic nature of the situation, uncertainty, and risks. A review of methods and models demonstrates an interest in developing tools to optimize volunteer management. A trend toward integrating different approaches, taking into account uncertainty and the dynamics of crisis situations, has been identified. The results of this analysis provide a theoretical basis for the development of algorithms and functionality for an automated volunteer distribution and routing system.*

**Keywords:** *volunteer routing, modeling, optimization, visualization.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
18.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
14.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-29

**Якимчук Н. М., Лукомський І. В.**

Луцький національний технічний університет

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА

В статті У статті представлено результати теоретичного та аналітичного дослідження енергетичної ефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (*Visible Light Communication, VLC*). Розроблено уніфіковану методику оцінювання показників енергоефективності, яка враховує вплив ключових параметрів системи – ефективності світлодіодів, чутливості фотоприймача, площі детектора, рівня шумів та множинних відбиттів від поверхонь. Проведено порівняльний аналіз трьох типових методів модуляції: *On-Off Keying (OOK)*, *Pulse-Width Modulation (PWM)* та *Color-Shift Keying (CSK)* при фіксованому рівні освітленості. Встановлено, що *OOK* та *PWM* забезпечують близькі значення енергетичної ефективності, тоді як *CSK*, потребуючи більших енергетичних витрат, має перевагу в спектральній ефективності та потенціалі для високошвидкісної передачі даних. Врахування фонових шумів та геометричних характеристик середовища дозволило уточнити умови, за яких зростає або знижується ефективність системи. Результати дослідження мають практичне значення для проектування енергоощадних *VLC*-систем нового покоління, що поєднують функції освітлення та передачі інформації з мінімальними витратами енергії.

**Ключові слова:** *Li-Fi, VLC, модуляція, On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM), Color-Shift Keying (CSK), енергоефективність, SNR, фотодетектор, світлодіод.*

**Постановка проблеми.** Технології зв'язку на основі видимого світла (*Visible Light Communication, VLC*) стрімко розвиваються як перспективна альтернатива традиційним радіочастотним системам. Використання світлодіодів у ролі передавачів дає змогу забезпечити одночасно функції освітлення та передачі даних, проте вимагає адаптації методів модуляції до специфіки оптичного середовища. На відміну від радіочастотних каналів, у *VLC*-системах інформація може передаватися лише зміною інтенсивності світла, оскільки фотоприймачі реагують на потік випромінювання, а не на його фазу чи амплітуду. Це накладає обмеження на вибір модуляційних методів і створює низку технічних викликів, пов'язаних з уникненням мерехтіння, збереженням якості освітлення та забезпеченням енергетичної ефективності.

Одним із ключових питань є досягнення компромісу між швидкістю передачі даних, стійкістю до шумів та споживанням енергії. Різні методи модуляції – такі як *On-Off Keying (OOK)*, *Pulse-Width Modulation (PWM)* і *Color-Shift Keying (CSK)* – демонструють суттєві відмінності за спектральною ефективністю та енергетичними характеристиками. Тому дослідження енергоефективності цих методів є важливим для розробки високопродуктивних *VLC*-систем нового покоління. Оптимізація модуляції дозволяє мінімізувати енергоспоживання при збереженні необхідної якості зв'язку, що має особливе значення для побудови екологічно ефективних бездротових технологій освітлення та позиціонування.

**Аналіз останніх досліджень.** Вже упродовж тривалого часу зростає інтерес до технологій *VLC / Li-Fi*, що обумовлено їхнім потенціалом поєднувати освітлення й високошвидкісну передачу даних. Сучасні огляди узагальнюють прогрес у цифровій обробці сигналів, апаратних рішеннях та експериментальних демонстраціях, які дозволяють досягати високих пропускних здатностей за допомогою *LED* і спеціалізованих приймачів [1], [2]. Разом з цим література показує, що практичне розгортання обмежується реальними властивостями світлодіодів (люмінофорні затримки, нелінійність), вимогами до димінгу та уникнення видимого мерехтіння, а також впливом фонового освітлення на *SNR/BER* [1], [11].

Одне з головних напрямків – розвиток багатовимірних та багатоканальних підходів (*CSK, MIMO, OFDM*-подібні схеми) для підвищення спектральної ефективності. Роботи з *CSK* підкреслюють перевагу кольорової мультिकанальної передачі, що дозволяє інтегрувати передачу інформації та підтримувати біле освітлення; одночасно вони вказують на підвищені вимоги до калібрування, спектральної чутливості приймача та потребу у підвищеному *SNR* для забезпечення низького *BER* [5], [6]. Дослідження *MIMO-VLC* демонструють додаткові

можливості підвищення пропускної здатності, проте вказують на ускладнення задач калібрування просторових каналів та енергетичні накладні витрати апаратури [3], [12].

Інша велика група робіт присвячена інтенсивнішим модуляціям, які сумісні з функцією освітлення – OOK, PWM, PPM і їхнім модифікаціям (MPPM, EPPM, MEPPM, VPPM). Загальні огляди та експерименти підтверджують: прості схеми (OOK, PWM) забезпечують простоту реалізації та відносну енергоефективність при фіксованому середньому освітленні, тоді як імпульсні схеми (PPM-різновиди) мають кращу енергоефективність і стійкість до нелінійностей, але жертвують спектральною щільністю без подальших модифікацій або гібридизації [1], [11]. Нові покращення VPPM та варіативних PPM-рішень спрямовані на одночасне забезпечення димінгу й стійкого передавання, зокрема шляхом детекторних алгоритмів, нечутливих до рівня димінгу [7-8].

У сфері приймачів і методів детекції помітний прогрес у розробці покращених схем виявлення для PPM та інших нечутливих до фази режимів; це зменшує втрати продуктивності енергодетекційних схем і дозволяє підвищувати швидкість при заданому BER [9], [10]. Також висвітлюються підходи до енергоефективної оптимізації ресурсів (передача + розподіл потужності, SLIPT, NOMA, RIS-допомога) у VLC-мережах, що демонструють значний інтерес до оптимізації споживання енергії як ключового індикатора енергоефективності системи [13], [14].

Окрім технічних рішень, значна частина останніх праць приділяє увагу гібридизації Li-Fi та Wi-Fi (HLWNets) для досягнення надійності покриття та ефективного керування ресурсами у багатоклієнтських середовищах; ці дослідження розглядають взаємодію на мережевому рівні, вплив модулювання на мобільність і заходи щодо балансування навантаження й керування переходами між середовищами зв'язку [4].

Незважаючи на помітний прогрес, у літературі виявляються системні прогалини. По-перше, відсутні узгоджені, експериментально підтверджені методики прямого порівняння різних модулювань за спектральними та енергетичними критеріями з урахуванням нелінійних характеристик білих LED і реальних шумових моделей. По-друге, для CSK все ще не вироблено практично зручних процедур калібрування під різні типи джерел (RGB/QLED) і реальні внутрішні відбивні середовища; це ускладнює її впровадження в широких осередках освітлювального обладнання [5]. У цьому контексті систематичний енергетичний аналіз для ключових схем модуляції при фіксованому середньому освітленні, із моделями нелінійності LED і реалістичними шумовими умовами, заповнює помітну прогалину між теоретичними оцінками та інженерними вимогами до впровадження VLC у освітлювальні мережі. Такий підхід дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо вибору модуляції залежно від завдань освітленості, зон покриття та апаратних обмежень.

**Метою даного дослідження є кількісне порівняння енергоефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (VLC/Li-Fi) з урахуванням практичних обмежень світлодіодних джерел випромінювання та фотоприймальних пристроїв.**

**Виклад основного матеріалу.** Модуляція у системах Li-Fi має суттєві відмінності від модуляції у традиційних радіочастотних системах. У радіочастотних каналах інформація може кодуватися за фазою та амплітудою сигналу, проте у випадку видимого світла такі методи непридатні. Це пов'язано з тим, що світловий потік не може змінювати фазу або амплітуду у звичному радіочастотному сенсі, оскільки фотодетектори сприймають лише інтенсивність випромінювання, а не його фазу.

Отже, у VLC модуляція досягається шляхом зміни інтенсивності світла, де рівень яскравості світлодіода відповідає інформаційному вмісту переданого сигналу. Такий принцип отримав назву модуляції за інтенсивністю із подальшою детекцією прямого випромінювання.

Під час розробки схеми модуляції для VLC необхідно враховувати два основні фактори:

1) Уникнення видимого мерехтіння. Одним із головних завдань є запобігання видимому мерехтінню, адже основна функція світлодіодів – це енергоефективне освітлення. Для уникнення дискомфорту зорового сприйняття частота перемикавання сигналу має бути понад 200 Гц, а у високошвидкісних системах може досягати 10 МГц. Такий підхід дозволяє передавати дані без погіршення якості освітлення для користувача.

2) Збереження якості яскравості. Протоколи мультиплексування не повинні негативно впливати на яскравість освітлення, тому вибір методу модуляції має враховувати цю вимогу. Різні види діяльності потребують різного рівня освітленості. Наприклад, для звичайної візуальної активності у громадських приміщеннях необхідно 30–100 люкс. Таким чином, дизайн

модуляції повинен забезпечувати можливість димування – плавного регулювання яскравості без спотворення переданих даних.

Одним із найпростіших і найпоширеніших методів є модуляція ввімкнення/вимкнення (On-Off Keying, OOK). У цьому методі біт «1» передається шляхом вмикання світлодіода, а біт «0» – його вимкненням. На практиці LED не вимикається повністю, а лише зменшує інтенсивність випромінювання, що забезпечує комфортне освітлення. Перевагами OOK є простота реалізації та низька обчислювальна складність, однак обмеженням є низька швидкість передавання даних, особливо у випадку використання білих світлодіодів із жовтим люмінофором, який має повільну часову реакцію. Застосування фільтрації та аналогового вирівнювання дозволило підвищити швидкість передавання до понад 100 Мбіт/с, проте принципово метод залишається малоефективним для високошвидкісних систем.

Для підвищення ефективності було запропоновано імпульсні методи модуляції, у яких інформація кодується параметрами імпульсів, такими як ширина або положення у часі. Модуляція за шириною імпульсу (Pulse Width Modulation, PWM) регулює тривалість імпульсу відповідно до рівня яскравості. Це дозволяє не лише передавати дані, а й реалізовувати функцію димування, тобто регулювання освітленості у межах 0–100%. Недоліком PWM є низька швидкість передачі (до кількох кілобіт за секунду), тому у подальших роботах вона поєднувалася з іншими методами, наприклад, із дискретною багатотональною модуляцією (Discrete Multitone, DMT), що дозволило одночасно керувати освітленням і передавати дані на вищих швидкостях.

Суттєвим кроком уперед у розвитку VLC стала модуляція зі зсувом кольору (Color Shift Keying, CSK), запропонована у стандарті IEEE 802.15.7. Її суть полягає у зміні відносних інтенсивностей трьох кольорових компонентів – червоної, зеленої та синьої – у джерелі світла типу RGB. Комбінація цих інтенсивностей створює біле світло, але одночасно передає інформацію через зміни координат кольору у колірному просторі. На відміну від систем, що базуються на білих світлодіодах із жовтим люмінофором, CSK забезпечує значно більшу швидкість передавання даних, оскільки кожен колірний канал може використовуватися як незалежний носій інформації (табл. 1). При цьому використовується хроматична діаграма (Рис. 1), де координати  $x$  і  $y$  відповідають параметрам кольору, сприйнятим людським оком. CSK є перспективним методом, оскільки дозволяє досягти високих швидкостей передавання без погіршення якості освітлення.

Таблиця 1 – Центральні, кодові та хроматичні координати, що використовуються сімома смугами, які застосовуються в CSK [6]

Діапазон (нм)	Код	Центр (нм)	Координати (x, y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

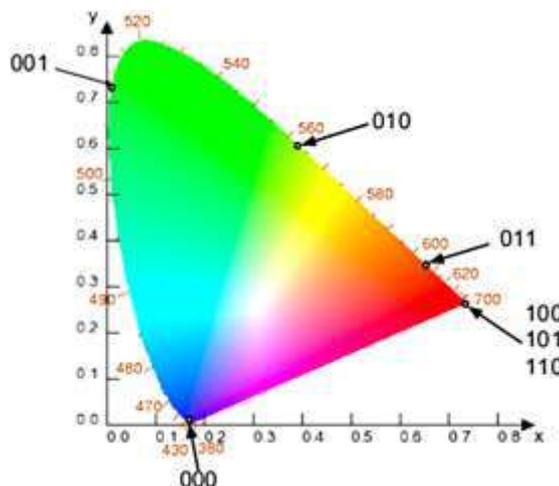


Рисунок 1 – Хроматична діаграма CSK [6]

Іншим поширеним методом є модуляція за позицією імпульсу (Pulse Position Modulation, PPM), у якій часова тривалість символу ділиться на рівні інтервали, а передавання здійснюється в одному з них. Такий підхід має високу енергетичну ефективність, але страждає на низьку швидкість передачі, оскільки в кожному символі використовується лише один імпульс. Для подолання цього обмеження було розроблено модифікації: багатоімпульсну PPM (MPPM), яка передбачає кілька імпульсів у межах одного символу, що підвищує спектральну ефективність; виключену PPM (EPPM), створену для систем, обмежених піковою потужністю; та багаторівневу EPPM (MEPPM), яка додатково збільшує щільність передавання інформації. Порівняльний аналіз цих методів показує, що вони забезпечують високу стійкість до мерехтіння та нелінійностей світлодіодів, водночас зберігаючи можливість регулювання яскравості (табл. 2).

Таблиця 2 – Аналіз ефективності видів модуляції за позицією імпульсу [6]

Метод модуляції	Підтримка димування	Спектральна ефективність	Сприйнятливості до мерехтіння	Вплив нелінійності LED
MPPM (Multipulse PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
EPPM (Expurgated PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
MEPPM (Multilevel EPPM)	Так	2–3	Дуже низька	Низький

Традиційна модуляція за позицією імпульсу (PPM, Pulse Position Modulation) передбачає використання високої напруги для представлення логічної «1». Оскільки інтенсивність світла пов'язана з робочим циклом сигналу, надто розріджена послідовність даних у PPM може призводити до зниження середньої яскравості.

Щоб усунути цей недолік, застосовується інверсна модуляція з лінійним положенням імпульсу (I-LPPM, Inverted Linear Pulse Position Modulation), у якій позиція імпульсу PPM інвертується. Це забезпечує збільшення середньої переданої потужності світлодіода і, відповідно, підвищує якість освітлення.

Крім цього, стандарт IEEE 802.15.7 визначає змінну модуляцію за позицією імпульсу (VPPM, Variable Pulse Position Modulation), що дозволяє уникнути ефекту мерехтіння; реалізувати механізм регулювання яскравості (dimming control). Попри переваги, VPPM наразі застосовується лише в обмеженій кількості систем позиціонування, і потребує подальших наукових досліджень для підвищення ефективності її використання у VLC-технологіях.

**Методика дослідження.** Одним із ключових аспектів проектування всіх видів систем зв'язку є енергетична ефективність, тобто здатність системи передавати максимальну кількість інформації при мінімальних енергетичних витратах [15]. У контексті VLC це питання набуває подвійного значення: енергія витрачається не лише на передачу даних, але й на освітлення, тому метод модуляції має забезпечувати баланс між інформаційною продуктивністю та якістю освітлення.

Енергоефективність у VLC оцінюється через відношення кількості переданих бітів до спожитої енергії, виражене у бітах на джоуль, або через енергію на біт  $E_b$ , що визначається як:

$$E_b = \frac{P_{el}^{сеп}}{R_b}, \quad (1)$$

де  $P_{el}^{сеп}$  – середня електрична потужність LED/системи,  $R_b$  – швидкість бітів.

Оскільки у VLC сигнал формується зміною інтенсивності світлового потоку, оптична потужність, яка досягає фотоприймача, визначається як функція геометрії простору, властивостей джерел та фотоприймача. Для однорідного набору  $N$  LED джерел з ламбертівським розподілом інтенсивності можна записати [7]:

$$P_s = \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R P_{T_i}}{2\pi D_i^2} \cos^m(\theta_i) \cos^M(\psi_i) T_s(\psi_i) g(\psi_i), \quad (2)$$

де  $D_i$  – відстань між  $i$ -м світлодіодом та приймачем,  $A_R$  – ефективна площа фотодетектора,  $P_{T_i}$  – оптична потужність джерела,  $\theta$  – кут випромінювання,  $\psi$  – кут падіння на приймач,  $T_s(\psi_i)$  –

коефіцієнт пропускання оптичного фільтра,  $g(\psi_i)$  – коефіцієнт підсилення концентратора, а  $m$  та  $M$  – ламбертівські порядки для джерела та приймача відповідно.

Електричний струм на виході фотодетектора визначається:

$$I_s = R \cdot P_r = R(P_s + P_{bg}), \quad (3)$$

де  $R$  – чутливість фотодіода, А/Вт,  $P_s, P_{bg}$  – оптична потужність, що надходить від джерела (сигнальна складова) та потужність фонового освітлення.

Співвідношення сигнал/шум, **SNR**, в приймачі:

$$SNR = \frac{(R \cdot P_s)^2}{\sigma_n^2}. \quad (4)$$

де  $\sigma_n^2$  – сумарна дисперсія шуму.

Шумова модель включає стрілочний, термічний та темновий шуми [7]:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{therm}^2 + \sigma_{dark}^2, \quad (5)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_sB, \quad (6)$$

$$\sigma_{therm}^2 = \frac{4kTB}{R_l}, \quad (7)$$

$$\sigma_{dark}^2 = 2qRP_{bg}B, \quad (8)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура (300 К),  $B$  – смуга частот приймача ( $B \approx R_b/2$ ),  $R_l$  – еквівалентний опір навантаження.

Вимоги по SNR для кожного типу модуляції визначають, яка оптична (і отже електрична) потужність потрібна для досягнення цільового BER. Різні моди мають різні вимоги: у загальному, багаторівневі/мультисимвольні методи (CSK з багатоточковою констеляцією) потребують вищого SNR ніж просте дворівневе ООК для однакового BER. Оцінка необхідної електричної потужності здійснюється як:

1) Для ООК методу. Символ «1»: LED випромінює ( $P_{on}=P_t$ ). Символ «0»: ( $P_{off}=0$ ). При випадкових 0/1 з ймовірністю  $D=0.5$  середня оптична потужність  $N$  LED джерел:

$$\overline{P}_t^{OOK} = NP_tD. \quad (9)$$

Електрична потужність (за ефективністю LED  $\eta$ ):

$$P_t^{OOK} = \overline{P}_t^{OOK} / \eta. \quad (10)$$

2) При використанні PWM інформація кодується шириною імпульсу; при тій самій середній яскравості PWM може застосувати вищий піковий струм, але середня оптична потужність для заданого рівня освітленості однакова. Для енергетичного аналізу при тому ж середньому освітленні:  $\overline{P}_{el}^{PWM} \approx \overline{P}_t^{OOK}$ , але спектральні властивості та SNR на біт можуть відрізнитись (через ширину імпульсу/частоту PWM і ширину каналу).

3) Для CSK передача символів за зміною відносної інтенсивності каналів різних кольорів (наприклад RGB). Загальна оптична потужність розподіляється по кольорах.

Для даного середнього освітлення сумарна оптична потужність може бути такою ж, як у ООК, але щоб досягти того ж BER, CSK зазвичай вимагає вищого SNR (внаслідок меншого мінімального евклідового відстані констеляції у відтінковому просторі), отже потребує більшої потужності (або кращого приймача).

Розглянемо приклад розрахунку для моделі з чотирьох світлодіодів, розміщених у вигляді квадратної решітки в межах одного приміщення. Розглянуто режим мультиплексування AllSame – усі LED передають однакову інформацію; сигнали сумуються на приймачі, що покращує SNR.

Для досягнення цільового рівня бітової похибки ( $BER \approx 10^{-6}$ ) приймемо як необхідне опорне значення  $SNR=10$  для всіх методів модуляції.

Порівняльний аналіз виконано при однаковому середньому рівні освітленості, що дозволяє об'єктивно оцінити енергоефективність кожної схеми без спотворення освітлювальних характеристик. Для базових умов: кімната  $4 \times 4$  м; LED розташовані у сітці на стелі (висота 3,0 м) у точках (1,1), (1,3), (3,1), (3,3) в метрах; фотоприймач розміщений у центрі кімнати на висоті 0,85 м (робоча поверхня); вертикальна відстань від LED до приймача  $z = 3.0 - 0.85 = 2.15$  м. Параметри LED/приймача: пікова оптична потужність одного LED  $P_l = 0.5$  Вт (оптична); кут напівсили  $\theta_{1/2} = 60^\circ$ , (тоді Ламбертівський порядок  $m = 1$ ); площа фотодіода  $A_{pd} = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ; чутливість фотодіода  $R = 0.4$  А/Вт; оптичний фільтр і концентратор з параметрами:  $T_s = 1$ ,  $g = 1$ ; LED електрооптична ефективність  $\eta = 0.30$  (30%), бітрейт  $R_b = 10$  Мбіт/с; умовна дисперсія шумового струму  $\sigma_n = 10^{-6}$  А; усі 4 LED передають однаково (симетрично).

Результати узагальнено у вигляді показників в таблиці 3.

Таблиця 3 – Енергетика випромінювання для трьох видів модуляції

Модуляція	Середня опт. потужн., Вт	Середня ел. потужн., Вт	Енергія на біт, Дж/біт	Ефективність, біт/Дж
OOK	1.0	3.333	$3.33 \cdot 10^{-7}$	$3.0 \cdot 10^6$
PWM	$\approx 1.0$	$\approx 3.333$	$\approx 3.33 \cdot 10^{-7}$	$\approx 3.0 \cdot 10^6$
CSK	2.0	6.667	$6.67 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^6$

За однакового середнього освітлення OOK і PWM дають схожу енергоефективність, бо середня оптична потужність однакова. PWM може мати інші переваги/недоліки (легкість димування, простота апаратної реалізації).

CSK у загальному випадку буде менш енергоефективним, якщо для досягнення того ж BER вимагає вищого SNR (а отже і більшої оптичної потужності). Однак CSK дає додаткові переваги (мультиканальна передача, кольорові констеляції, сумісність з RGB-освітленням).

Встановлено ключові фактори, що впливають на показники ефективності в практичних застосуваннях числа: ефективність LED  $\eta$ , чутливість фотоприймача  $R$ , площа фотодіода  $A_{pd}$ , **рівень шуму**, бітрейт, спосіб мультиплексування (якщо LED несуть різні дані), затінення та рефлексії (множинні відбиття від поверхонь кімнати підвищують  $P_r$  і поліпшують енергоефективність). Було отримано залежності середньої електричної потужності системи від ключових параметрів для трьох видів модуляції для забезпечення цільового SNR (рис. 2).

Аналіз показує, що:

- CSK потребує значно більшої потужності для досягнення заданого BER, що пояснюється вищими вимогами до SNR через використання багаторівневої констеляції кольорів;
- OOK і PWM демонструють близькі показники, оскільки їхні SNR-вимоги ідентичні, а відмінність полягає лише у часовому співвідношенні імпульсів;
- підвищення ефективності світлодіодів  $\eta$  або чутливості фотоприймача  $R$  прямо зменшує необхідну електричну потужність;
- збільшення площі фотодіода  $A_{pd}$  покращує збір оптичної потужності, проте надмірне зростання може збільшити шум і є обмеженим технологічно;
- зростання швидкості передавання  $R_b$  або ширини смуги  $B$  веде до зростання шумів і, відповідно, до потреби у вищій потужності;
- вплив затінення та відбиттів має критичний характер – зменшення  $K_0$  через часткове перекриття променів може підвищити необхідну потужність на порядок;

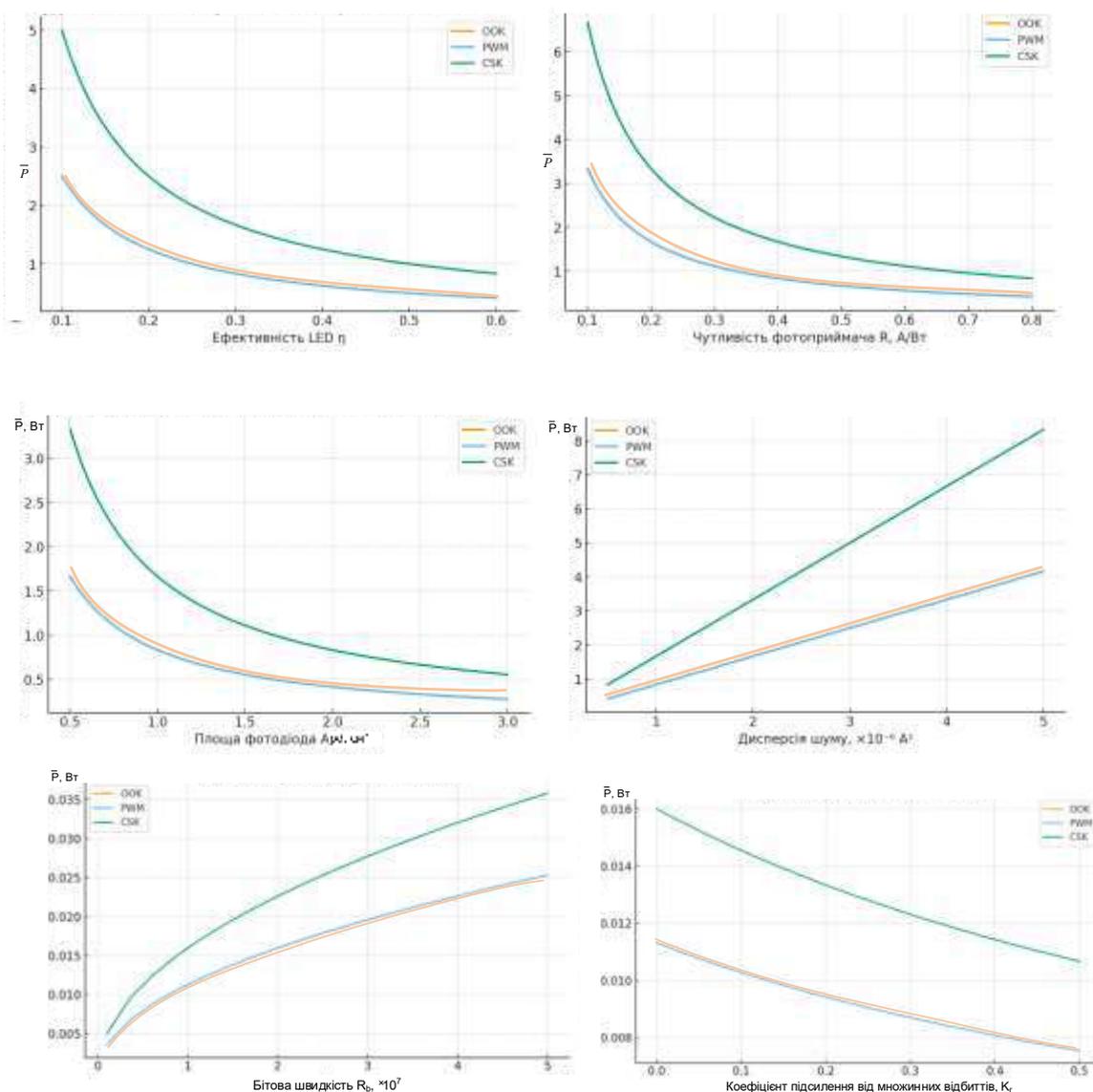


Рисунок 2 – залежність середньої електричної потужності системи від ключових параметрів VLC-системи

Ці результати наочно демонструють: OOK і PWM мають близькі енергетичні характеристики, тоді як CSK забезпечує більшу пропускну здатність ціною підвищеного енергоспоживання, що підтверджує висновки аналітичної частини дослідження. Дослідження є підґрунтям для розробки адаптивних методів вибору модуляції залежно від вимог до освітленості, швидкості та енергоспоживання.

**Висновки.** Проведене дослідження дозволило оцінити енергетичну ефективність основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла та порівняти різні методи не лише за швидкістю передавання або стійкістю до завад, а й за критерієм енергії на біт при сталому рівні освітленості, що є критично важливим для практичного впровадження у системах «розумного» освітлення, автомобільних Li-Fi-комунікаціях та мережах IoT. Розроблена аналітична модель із урахуванням шумових процесів, ефективності LED, чутливості фотоприймача, площі детектора та впливу відбиттів дала змогу кількісно визначити залежність середньої електричної потужності системи від цих параметрів при фіксованому рівні освітленості. Отримані результати показали, що методи On-Off Keying та Pulse-Width Modulation мають практично однакову енергетичну ефективність і є доцільними для застосування у побутових та офісних VLC-системах, де пріоритетом є низьке енергоспоживання та стабільна якість освітлення. Водночас метод Color-Shift Keying, незважаючи на більші енергетичні витрати, продемонстрував перевагу в спектральній ефективності та потенціал для реалізації високошвидкісних каналів передачі даних. Врахування фонових шумів та множинних відбиттів

показало, що ці фактори істотно впливають на необхідну потужність для досягнення цільового SNR. Таким чином, запропонована методика енергетичного аналізу, що поєднує аналітичні моделі з урахуванням шумових процесів, оптичних параметрів і геометрії середовища, може бути застосована для оцінювання ефективності гібридних і багаторівневих схем модуляції, зокрема Variable Pulse Position Modulation (VPPM), Multi-Pulse PPM (MPPM), Multi-Level Expurgated PPM (MEPPM), Discrete Multitone Modulation (DMT) та Color-Intensity Modulation (CIM).

#### Інформаційні джерела

1. Loureiro P. A., Guiomar F. P., Monteiro P. P. Visible light communications: A survey on recent high-capacity demonstrations and digital modulation techniques. *Photonics*, 10(9), 993, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
2. Gupta S., Roy D., Bose S., Dixit V., Kumar A. Illuminating the future: A comprehensive review of visible light communication applications. *Optics & Laser Technology*, 177, 111182, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111182>
3. Sejan M. A. S., et al. A comprehensive survey on MIMO visible light communication: Current research, machine learning and future trends. *Sensors*, 23(2), 739, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020739>
4. Besjedica T., Fertalj K., Lipovac V., Zakarija I. Evolution of hybrid LiFi–WiFi networks: A survey. *Sensors*, 23(9), 4252, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094252>
5. Becerra R., Azurdia-Meza C. A., Palacios Játiva P., Soto I., Sandoval J., Ijaz M., Carrera D. F. A wavelength-dependent visible light communication channel model for underground environments and its performance using a color-shift keying modulation scheme. *Electronics*, 12(3), 577, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030577>
6. Yu T. C., Huang W. T., Lee W. B., Chow C. W., Chang S. W., Kuo H. C. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications. *Crystals* 2021, 11, 1098, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11091098>
7. Zhu Z., Yang Y., Chen M., Guo C., Cheng J., Cui S. A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges. *arXiv preprint*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.13893>
8. Beguni C. et al. Increasing Vehicular Visible Light Communications Range by Modified VPPM. *Sensors. PMC*, Mar 31; 23(7): 3656, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23073656>
9. Khani H. Improved Detection Schemes for Non-coherent PPM. *Wireless Pers. Commun.*, 131, 2173–2192, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10537-7>
10. Islam M. S., Younis M., Mahmud M. and Choa F. S. An Efficient Pulse Position Modulation Scheme to Improve the Bit Rate of Photoacoustic Communication. 2023 32nd Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA, 2023, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WOCC58016.2023.10139346>.
11. He C., Ali W. Advances in visible light communication. *Photonics*, 10(11), 1277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10111277>
12. Hassan E. S., Jabbari A., Alharbi A. A. Evaluating MIMO-VLC System Performance: Modulation Techniques and Ambient Light Interference Effects. *Photonics*, 12(7), 649, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics12070649>
13. Ncube W. Z., Qidan A. A., El-Gorashi T., Elmirghani J. M. N. On the energy efficiency of Laser-based Optical Wireless Networks. *ArXiv*, arXiv:2203.10904, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.10904>
14. Ihsan A. et al. Energy-Efficient TDMA-NOMA for RIS-Assisted Ultra-Dense VLC Networks. 2024. 13 p. URL: <https://strathprints.strath.ac.uk>
15. Zablotskyi V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022. PP. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>

Дата першого надходження  
статті до видання  
09.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
07.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р

УДК 621.941-229

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-30

**Янюк Д. В.**

Луцький національний технічний університет

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ВЕЛИЧИНИ АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ДОВГОМІРНОЇ ПРУТКОВОЇ ЗАГОТОВКИ У ВЕРСТАТ**

*У статті проведено розробку і формалізацію статистичної методики оцінювання точності осьового положення торцевої поверхні циліндричної заготовки, сформованої шляхом автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу у токарний верстат, що працює в автоматичному циклі. Запропоновано підхід для параметричної оцінки ймовірності потрапляння торця, що утворений після відрізання попередньої деталі, в допуск його номінального положення в системі координат верстата. Проведено розгляд даного процесу як нормальну модель, непараметричну біноміальну оцінку частки відповідності з довірчими інтервалами ( $P_{ок}$ ), індекс здатності процесу ( $C_{рк}$ ) та оцінку невизначеності за GUM. Запропонована методика передбачає стратифікацію вибірок за умовами виробництва, корекцію на шум засобу вимірювання, планування обсягу даних для заданої точності оцінки, а також SPC-моніторинг. Показано, як через калібрування зсуву  $\mu$ , управління розкидом  $\sigma$  та інженерні втручання досягати цільових показників центрованості та прогнозованості процесу подачі. Практична значущість полягає у формуванні прийнятних критеріїв якості без зупинки виробництва та без витрат на спеціальні експерименти за ознаками  $P_{ок}$  (відсоткова частка циклів у яких торець потрапляє у допуск) і  $C_{рк}$  (наскільки стабільно процес позиціонування прутка вкладається в допуск з урахуванням центрованості та розкиду).*

**Ключові слова:** верстат, шпindelний вузол, різання, параметри обробки, моделювання, автоматизація, трибологія, прогнозування, ймовірність, оптимізація, точність, інновації процесу, адаптація технологічної системи.

**Постановка проблеми** В умовах масового виробництва з використанням токарних автоматів критичним фактором ефективності є мінімізація допоміжного часу та матеріаломісткості. Одним із шляхів оптимізації обробних процесів є відмова від операції підрізання торця заготовки після її автоматичної подачі або мінімізація припуску на цю операцію. Однак, прийняття такого рішення неможливе без гарантованої стабільності процесу позиціонування.

На практиці інженери стикаються з проблемою інтерпретації даних через складності визначення причини виходу розміру за межі допуску. Традиційне використання лише індексу придатності  $C_{рк}$  часто є недостатнім, оскільки воно не враховує довірчі інтервали при малих вибірках та не розділяє власну мінливість процесу подачі від невизначеності, внесеної засобом контролю. Актуальним є перехід від констатації факту браку до прогнозування поведінки системи подачі з використанням розширеного статистичного апарату, що включає оцінку невизначеності за стандартами GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement)[1].

**Аналіз останніх досліджень** Результати дослідження [2] показують вплив точності осьового позиціонування заготовки на ефективність її обробки в автоматичному режимі та її економічні показники загалом. Оцінка точності осьового положення часто потрапляє під умови невизначеності, що описано у [1]. Точність позиції інструмента та її вплив на продукцію стала ціллю дослідження [3], однак не розглянуто вплив точності подачі, що описав автор у [4], хоча не розширив тему на подачу заготовки. У [5] показали результати статистичного моделювання основних технологічних характеристик верстатах, що відкриває можливість інтерполяції методу на моделювання процесів, які спричиняють виникнення похибок. Автор у [6] розробив методику визначення розподілу відхилень лінійного розміру деталей оброблених на токарних верстатах, однак не використав статистичні методи контролю [7] для підвищення якості продукції. У [8, 9] продемонстровано можливості покращення умов автоматичної фіксації пруткових довгомірних заготовок але не проаналізовано ключові фактори появи можливих відхилень характеристик даного процесу. Розробка засобів для оцінювання величини подачі пруткової заготовки з врахуванням невизначеності параметрів процесу створює передумови для виявлення та подальшого усунення значної частини джерел нестабільності функціонування системи, що підтверджує актуальність теми даних досліджень.

**Метою роботи** є вдосконалення методології оцінювання величини автоматичної подачі довгомірної пруткової заготовки з врахуванням варіабельності процесу через невизначеність оцінки його параметрів та використання толерансних інтервалів. Це дасть можливість впровадження SPC (statistical process control) алгоритмів, раннього виявлення змін а також кількісної оцінки здатності процесу функціонувати в межах визначених допусків.

**Виклад основного матеріалу.** Основою коректного статистичного аналізу є однорідність вибірки. Параметри процесу автоматичної подачі прутка такі як систематичний зсув –  $\mu$  та величина розкиду –  $\sigma$  суттєво залежать від змінних факторів: діаметра та матеріалу прутка, типу затискного елемента (цанга/патрон), швидкості подачі та температурного режиму. Змішування даних, отриманих за різних умов, призводить до мультимодальних розподілів, що унеможливило коректну оцінку. Пропонується застосовувати метод стратифікації – розбиття генеральної сукупності даних на квазістаціонарні підмножини (страти) з фіксованими умовами такі як діаметр та матеріал прутка, тип цанги або патрона, режим подачі та затиску, мастило, температура (табл. 1).

Таблиця 1 – Приклади формування підгруп (страт)

Діаметр	Матеріал	Тип цанги
10-20	Сталь	Стандартна
20-30	Алюміній	Малої жорсткості
30-40	Латунь	Зі вставками
Швидкість	Мастило	Температура
Низька (<1 м/с)	Консистентне	Холодна (<20°C)
Середня	Мінеральне	Нормальна
Висока (>2 м/с)	Синтетичне	Підвищена (>30°C)

Для забезпечення стабільності статистичних оцінок рекомендований обсяг вибірки на одну страту має становити  $n > 30$  циклів. Для оцінки ймовірності відповідності ( $P_{ok}$ ) з заданою абсолютною похибкою  $\varepsilon$  та рівнем довіри  $1 - \alpha$ , мінімальний обсяг вибірки  $n$  можна визначити за консервативною оцінкою:

$$n \geq \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{4\varepsilon^2} \quad (1)$$

де  $z$  – квантиль нормального розподілу,  $\varepsilon$  – гранично допустима абсолютна похибка.

Основні геометричні параметри, що підлягають визначенню під час кожної подачі у межах вибірки (рис. 1):

- $L_{set}$  – задана довжина подачі прутка як цільове значення, що формується як керуюча команда системи подачі (барфідера), яка містить інформацію наскільки далеко має бути проштовхнуто пруток уздовж осі шпинделя до його зупинки (рис. 1 а), тобто це референс у координатній системі верстата. Базова величина для порівняння з фактичною величиною подачі і може калібруватися (зміщуватися) за результатами статистики, коли виявляють систематичний зсув.

- $L_2$  – фактична довжина заготовки після затиску. Її можна визначити шляхом вимірювання положення торця використовуючи для відліку як фізичну контрольну точку, якою може бути торець затискного пристрою після завершення затиску так і віртуальну, яка буде прив'язана до координат верстата. Використовується для обчислення загальної похибки  $\Delta$  за якою оцінюють відповідність допуску розміру.

- $\Delta = L_2 - L_{set}$  – похибка осевого положення торця заготовки визначена різницею реальної та заданої довжини заготовки. Вказує на відхилення фактичного виступу від заданого. Може набувати як і незначних величин, які можуть входити у допуск на лінійні відхилення деталі (рис. 1 б), так і більш значущих, що призводить до збільшення витрат на обробку (рис. 1 в). Дана похибка є головною випадковою величиною для статистичного аналізу і на її основі обчислюють  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $P_{ok}$ ,  $C_{pk}$  та приймають інженерні рішення.

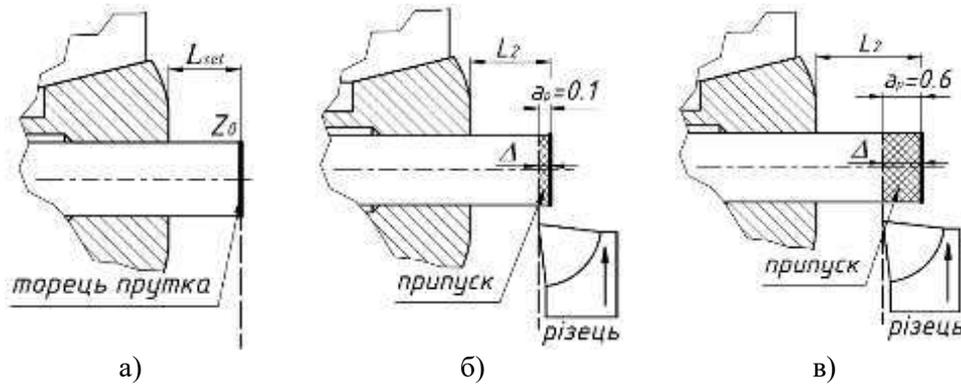


Рисунок 1 – Варіанти положення торця заготовки сформованої автоматичною подачею довгомірного прутка

У такому випадку похибка положення торця  $i$ -ого вимірювання:

$$\Delta_i = L_{2,i} - L_{set}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Наступним критичним етапом є відокремлення істинної мінливості процесу подачі від похибки вимірювальної системи. Спостережувана дисперсія  $s_{obs}^2$  є сумою дисперсії процесу  $\sigma_{process}^2$  та дисперсії вимірювальної системи  $\sigma_{gage}^2$ , що складається з повторюваність приладу вимірювання та похибки зчитування показників оператором:

$$s_{obs}^2 = \sigma_{process}^2 + \sigma_{gage}^2 \quad (3)$$

Для отримання коректних даних для розрахунку індексів придатності необхідно виконати корекцію:

$$\sigma_{process}^2 \leftarrow \max\left(s_{obs}^2 - s_{gage}^2 - \frac{q^2}{12}, 0\right), \quad (4)$$

де  $q^2/12$  – дисперсія шуму квантування (для цифрових датчиків з кроком  $q$ ). Без цієї корекції оцінка точності барфідера буде заниженою, що може призвести до хибних рішень про необхідність ремонту або налаштування.

Для визначення оцінок якості роботи системи подачі прутка можна використати різні методи відповідно до отриманих результатів після вимірів. За нормального розподілу, коли більшість похибок концентрується біля середнього, а великі відхилення практично відсутні, що свідчить про стабільну роботу барфідера, використовується параметричний підхід. Для визначення оцінок якості використовують наступні формули:

$$P_{ok} = \Phi\left(\frac{T-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-T-\mu}{\sigma}\right), \quad (5)$$

$$C_{pk} = \frac{T-|\mu|}{3\sigma} \quad (6)$$

Хорошим значенням  $C_{pk}$  вважається від 1,33 і вище. Однак при порушеннях роботи барфідера, коли виникають одиничні значні помилки, параметричні методи занижують ймовірність великих відхилень. За таких випадків, які частіше трапляються на не новому обладнанні, краще використовувати непараметричний підхід. Він забезпечує більш точну оцінку  $P_{ok}$  навіть при "важких хвостах", з іншого боку відбувається втрата інформації про те, наскільки похибка виходить за межі допуску (наскільки великі відхилення, яка форма розподілу, де саме концентрація проблем і т.п.). Для розрахунку кожен цикл перетворюється у бінарний результат типу «відповідно»/«невідповідно»:  $Y_i = 1\{\Delta_i \leq T\}$ , де  $Y_i = 1$  якщо цикл у допуску та  $Y_i = 0$  якщо інакше. Тоді

$$\hat{P}_{ok} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{k}{n} \quad (7)$$

де  $k$  – кількість циклів подачі прутка, що забезпечили потрапляння торця прутка у допуск. Ця оцінка є непараметричною оскільки не моделюється розподіл  $\Delta$ . Для визначення ймовірності потрапляння торця прутка у допуск проводять обчислення нормального довірчого інтервалу:

$\hat{P}_{ok} \pm z \sqrt{\hat{P}_{ok}(1 - \hat{P}_{ok})/n}$ , де  $z$  – квантиль стандартного нормального розподілу який відповідає рівню довіри (1.96 при рівню довіри 95%).

На відміну від наївного (нормального) інтервалу, що дає погане покриття, інтервал Вілсона має хороші властивості покриття, особливо при малих  $n$  або  $\hat{P}_{ok}$  поблизу 0 чи 1:

$$\left[ \frac{\hat{P}_{ok} + \frac{z^2}{2n} - z \sqrt{\frac{\hat{P}_{ok}(1 - \hat{P}_{ok}) + \frac{z^2}{4n^2}}{1 + \frac{z^2}{n}}}, \frac{\hat{P}_{ok} + \frac{z^2}{2n} + z \sqrt{\frac{\hat{P}_{ok}(1 - \hat{P}_{ok}) + \frac{z^2}{4n^2}}{1 + \frac{z^2}{n}}} \right]. \quad (8)$$

Він один з найбільш придатних для статистичного контролю якості, коли  $n < 30$ . Наприклад, при  $n = 20$  циклів,  $k = 18$  успішних,  $\hat{P}_{ok} = 18/20 = 0.9$ . 95% довірчий інтервал Вілсона: [0.714; 0.963].

У відповідності до сучасних метрологічних стандартів, необхідно розрізняти мінливість процесу, що описується через  $\sigma$ , та невизначеність оцінки, яка описується через змінні  $u$  та  $U$ . Стандартна невизначеність одиничного результату:  $u(\Delta) \approx \sigma$ , характеризує розкид значень положення торця від циклу до циклу. Це параметр, що визначає фізичну здатність барфідера тримати розмір. Стандартна невизначеність середнього значення:  $u(\bar{\Delta}) = \sigma/\sqrt{n}$ , характеризує наскільки точно ми визначили систематичний зсув процесу подачі. Для прийняття рішень про калібрування (внесення корекції в  $L_{set}$ ) використовується розширена невизначеність середнього  $U(\bar{\Delta})$  для довірчого інтервалу, який зазвичай становить 95%:

$$U(\bar{\Delta}) = t_{0.975, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

де  $t$  – коефіцієнт Стюдента. Якщо визначене середнє відхилення  $\bar{\Delta}$  по модулю менше за  $U(\bar{\Delta})$ , то систематичний зсув статистично не відрізняється від нуля, і вносити корекцію в налаштування недоцільно.

На відміну від довірчих інтервалів, які оцінюють середнє можливе розташування розподілу, для виробничих цілей важливіше знати можливі максимальні відхилення у майбутніх циклах подачі заготовок. Для задач такого типу застосовують толерансні інтервали  $TI$ . Двобічний толерансний інтервал визначається як:

$$TI = \bar{\Delta} \pm k \cdot s \quad (10)$$

де  $k$  – коефіцієнт толерантності, який залежить від обсягу вибірки  $n$ , необхідної частки охоплення популяції  $\gamma$  (наприклад, 99%) та рівня довіри  $1 - \alpha$  (наприклад, 95%). Значення  $k$  завжди більше за класичне  $z$  (для нормального розподілу), оскільки враховує невизначеність оцінки як середнього, так і стандартного відхилення від заданого положення торця прутка при обмеженій вибірці. Умова гарантованої якості роботи системи подачі заготовки формулюється як вкладеність толерансного інтервалу в поле допуску:

$$TI \subseteq [-T, +T] \quad (11)$$

Це набагато суворіший критерій, ніж  $C_{pk} > 1.33$ , і він забезпечує статистично обґрунтовану гарантію відсутності браку такого як недоподача, або надмірного припуску для майбутніх партій деталей.

На основі розглянутих методів та введених параметрів розроблено алгоритм статистичного керування процесом позиціонування при нормальному розподілу (рис. 2). За наявності відхилень у початковій вибірці, що свідчать про не нормальність розподілу, рекомендовано використовувати підходи описані вище.

Алгоритм передбачає розгляд та обробку даних про функціонування процесу подачі в наступній послідовності:

**Крок 1.** Збір даних та оцінка параметрів. Проводиться серія вимірів з  $n$  циклів для отримання вибірки похибок  $\Delta_i$ . Оцінюються параметри  $\mu$  та  $\sigma$ , розраховуються індекси  $C_{pk}$  та  $P_{ok}$ .

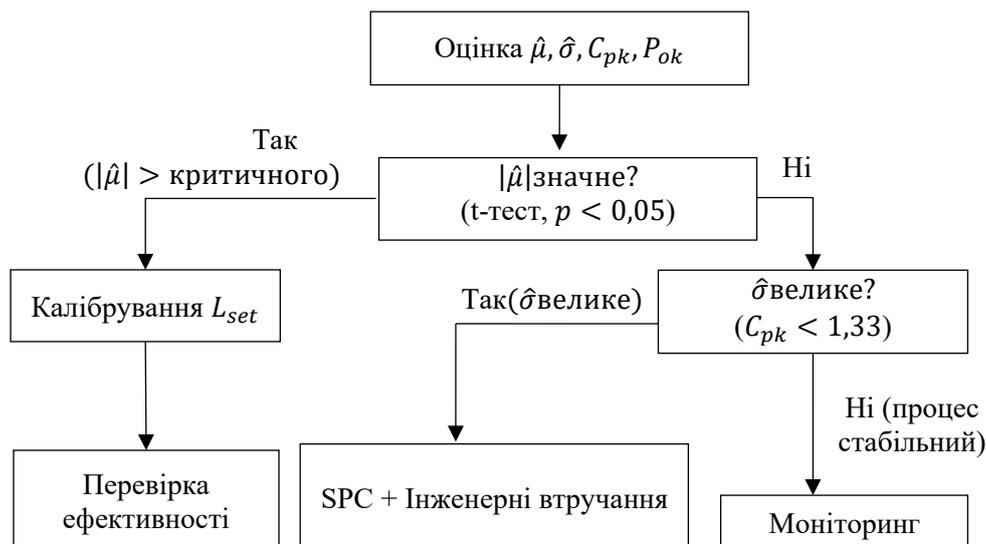


Рисунок 2 – Алгоритм оцінювання характеристик системи на основі параметрів варіабельності подачі пруткової заготовки

### Крок 2. Аналіз та прийняття рішень:

- Випадок 1 – існує значний систематичний зсув, тобто  $\mu$  статистично значуще відрізняється від нуля → необхідно калібрувати  $L_{set}$  для корекції. Наприклад, якщо  $\mu = +0.05$  мм, то  $L_{set\_new} = L_{set\_old} - 0.05$  мм.
- Випадок 2 – присутня велика мінливість результатів, тобто значення  $\sigma$  таке, що призводить до низького  $C_{pk} < 1.33$  → стабілізувати умови через інженерні втручання для зменшення  $\sigma$  та впровадити з-карти згідно SPC для моніторингу.
- Випадок 3 – процес стабільний що характеризується малим  $|\mu|$  та  $C_{pk} \geq 1.33$

**Крок 3.** Звітність, що допоможе прогнозувати процес подачі з тими ж параметрами. Для демонстрації правильності прийнятих рішень, доцільно точніше визначити оцінку зсуву з розширеною невизначеністю  $\mu \pm U$  та довірчі інтервали.

**Висновки.** Запропонована методологія дозволяє перейти від інтуїтивного налаштування машин подачі до науково обґрунтованого керування точністю. Використання розділених оцінок невизначеності вимірювання  $U$  та мінливості процесу  $\sigma$  запобігає помилковим втручанням у налаштування. Розглянуто як гарантувати якість позиціонування в умовах серійного виробництва за використання толерансних інтервали  $TI$ , які, на відміну від точкових оцінок, враховують обсяг вибірки та рівень довіри до даних. Умова  $TI \subseteq T$  є критерієм для можливості скасування операції підрізання торця. Розроблений алгоритм прийняття рішень інтегрує перевірку гіпотез та аналіз здатності процесу, що дозволяє чітко диференціювати необхідні дії: програмне калібрування  $L_{set}$  або фізичне вдосконалення системи подачі. Застосування непараметричних оцінок таких як інтервал Вілсона рекомендовано як метод контролю у випадках нестабільної роботи обладнання, що відрізняється наявністю викидів та ненормальним розподілом, для гарантованого підвищення правдивості оцінки ризиків браку.

### Інформаційні джерела

1. Willink R. On revision of the guide to the expression of uncertainty in measurement: proofs of fundamental errors in bayesian approaches. *Measurement: sensors*. 2022. С. 100416. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100416>
2. Investigation of cutting tool and workpiece positioning precision as a critical factor in enhancing machining accuracy / U. Turaeva та ін. *E3S web of conferences*. 2025. Т. 627. С. 04002. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562704002>
3. Kumari, S., Pathak, C., Vashist, S., & Mahapatra, P. K. (2023). Contactless measurement of error in lathe tool positioning. *У 2023 3rd international conference on intelligent technologies (CONIT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/conit59222.2023.10205386>

4. Дослідження розсіювання величин подач токарних верстатів в імовірнісному аспекті / В. В. Крупа та ін. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 4(83). С. 16–28. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.2>
5. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів / Т. І. Четвержук та ін. Наукові нотатки. 2021. № 71. С. 322–329. URL: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>
6. Lamnauer N. Y. Визначення якості технологічного процесу виготовлення виробів з заданим лінійним розміром. HERALD of the donbass state engineering academy. 2019. № 2 (46). С. 89–92. URL: [https://doi.org/10.37142/1993-8222/2019-2\(46\)89](https://doi.org/10.37142/1993-8222/2019-2(46)89)
7. Singh V. Statistical Process Control (SPC) guide line. *International journal of engineering applied sciences and technology*. 2022. Т. 7, № 1. С. 84–92. URL: <https://doi.org/10.33564/ijeast.2022.v07i01.013>
8. Придальний Б.І. Mechatronic clamping mechanism with electro-hydraulic actuator for machine spindle units. *Перспективні технології та прилади*. 2021. № 18. С. 124–128. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-18-18>
9. Prydalnyi B. Mechatronic device for two-stage clamping of cylindrical objects in machine tool spindles. *Journal of mechanical engineering and transport*. 2021. Т. 13, № 1. С. 118–123. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-118-123>

**Yaniuk D.**

Lutsk National Technical University

#### **DETERMINATION OF REGULARITIES IN THE VARIABILITY OF THE VALUE OF AUTOMATIC FEEDING OF A LONG BAR WORKPIECE INTO THE MACHINE**

*The article develops and formalizes a statistical method for evaluating the accuracy of the axial position of the end surface of a cylindrical workpiece formed by automatically feeding long bar stock into a lathe operating in an automatic cycle. An approach is proposed for parametric estimation of the probability that the end face formed after cutting the previous part will fall within the tolerance of its nominal position in the machine coordinate system. This process is considered as a normal model, non-parametric binomial estimation of the proportion of conformity with confidence intervals ( $P_{ок}$ ), process capability index ( $C_{pk}$ ), and uncertainty estimation according to GUM. The proposed methodology involves stratification of samples according to production conditions, correction for measurement noise, planning of data volume for a given estimation accuracy, and SPC monitoring. It shows how to achieve the target indicators of centering and predictability of the feeding process through calibration of the shift  $\mu$ , control of the dispersion  $\sigma$ , and engineering interventions. The practical significance lies in the formation of acceptable quality criteria without stopping production and without spending on special experiments based on the characteristics  $P_{ок}$  (percentage of cycles in which the end face falls within the tolerance) and  $C_{pk}$  (how stable the bar positioning process is within the tolerance, taking into account centering and dispersion).*

**Keywords:** machine, spindle unit; cutting, machining parameters, simulation, automation, tribology, forecasting, probability, optimization, precision, process innovation, technology system adaptation.

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
15.11.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
10.12.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!  
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО ЗБІРНИКА  
«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»**

1. Наукова стаття повинна мати наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290х210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об'ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1 см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: звичайний 12 пт., крупний індекс 7 пт., дрібний індекс 5 пт., крупний символ 18 пт., дрібний символ 12 пт.). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рис. 1. Схема ...) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов'язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім'я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Адреса для отримання збірника, e-mail, телефон.
- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові спеціальності:

G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка;

G6 Інформаційно-вимірювальні технології;

G7 Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;

G8 Матеріалознавство;

G9 Прикладна механіка;

G11 Машинобудування (за спеціалізаціями);

G22 Біомедична інженерія.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Ці спеціальності тісно пов'язані і доповнюють одна одну у сфері таких напрямків: прилади та системи фізичних та біомедичних технологій; прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні; проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки; метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація; проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України; фізика напівпровідників та діелектриків та фізика твердого тіла; прилади та методи вимірювання електричних, магнітних та механічних величин.

Редакційна колегія збірника забезпечує рецензування наукових статей, що подаються авторами до опублікування. Дотримані всі вимоги до редакційного оформлення наукового видання згідно державних стандартів України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com), в письмовому вигляді – за поштовою адресою: 43018, м. Луцьк, вул. Потєбні, 56, каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

*Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:*

- Перевірка статті на відповідність вимогам;
- Прийняття рішення щодо прийому статті;
- Інформування авторів про можливість публікації та дозвіл на оплату.

Статті приймаються українською або англійською мовами. Вартість публікації становить **70 грн.** за 1 сторінку.

Реквізити на оплату: Луцький національний технічний університет ЄДРПОУ 05477296 Р/р UA348201720313291011201017820 Призначення платежу: За інформаційно-аналітичне забезпечення наукової діяльності від ППБ.

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com).

Сайт видання <http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal>

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» індексується в Google Scholar, Crossref, Scientific Indexing Services у Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського, а також представлено у загальнодержавній технологічній платформі "Наукова періодика України".

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у головного редактора – *Марчука Віктора Івановича* за тел. 050-378-82-31, відповідального секретаря – *Пташенчука Віталія Віталійовича* за тел. 068-762-15-36 або за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com).



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Відповідальний за випуск Марчук В. І.  
Технічний редактор: Пташенчук В. В.  
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 30.12.2025 р.  
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.  
Ум. друк арк. 14. Обл.-вид. арк.12 Тираж 50 пр.

Видавництво «Вежа-Друк»  
43021, Україна, м. Луцьк, вул. Шопена 12



**Адреса редакції**

Україна, 43018, м.Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Тел.: (03322) 26-14-09; Моб.: 068-762-15-36.

Website: <http://forum.lntu.edu.ua/index.php/journal>

E-mail: [conceptm@gmail.com](mailto:conceptm@gmail.com)

