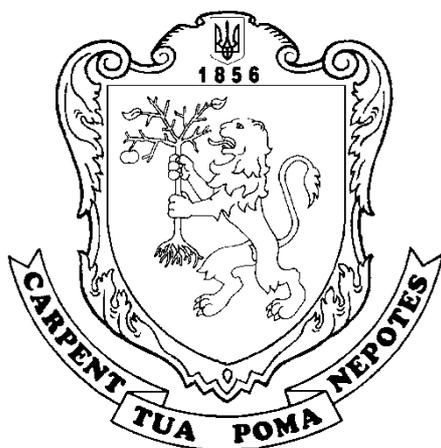


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ВІСНИК

ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Агроінженерні дослідження
№ 29



Львів 2025

Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження». 2025. № 29. 260 с.

Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також огляди в галузі агроінженерії щодо: вивчення властивостей сільськогосподарських матеріалів і ґрунтів; наукових засад створення нової техніки та технологій; механізації та автоматизації процесів і операцій агропромислового виробництва; сучасних технологій і технологічних процесів галузевого машинобудування; надійності та ефективного технічного сервісу машин; енергетики (передовсім відновлюваної); застосування інформаційних систем, а також управління проектами та програмами в агроінженерії; моделювання процесів, технологічних і виробничих систем (вирощування, транспортування, зберігання, первинної переробки сільськогосподарської продукції); інженерних аспектів екологічної безпеки та безпеки праці в агропромисловому виробництві.

Для наукових працівників, фахівців агропромислового виробництва, аспірантів і магістрів, а також студентів інженерних спеціальностей.

*Рекомендовано до друку вченою радою
Львівського національного університету природокористування
(протокол № 9 від 26.02.2025 р.)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Ковалишин Степан, к. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (головний редактор);

Власовець Віталій, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (заступник головного редактора);

Бабич Михайло, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування (відповідальний секретар);

Алекссюк-Гаврон Йоанна, доктор наук, Варшавський університет наук про життя (Польща);

Белосв Іван, доктор наук, Русенський університет імені Ангела Канчева (Болгарія);

Братішко Вячеслав, д. т. н., професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Валовський Гжегож, доктор наук, Інститут технологій і наук про життя (Польща);

Гнатів Андрій, д. т. н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

Голімовський Войцех, доктор наук, професор, Вроцлавський університет економіки та бізнесу (Польща);

Горбай Орест, д. т. н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка»;

Городецький Іван, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Гуменюк Руслан, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Гюнер Фарук, доктор наук, професор, Гіресунський університет (Туреччина);

Данченко Олена, д. т. н., професор, Черкаський державний технологічний університет;

Зубко Владислав, д. т. н., доцент, Сумський національний аграрний університет;

Кангалов Пламен, доктор наук, професор, Русенський університет імені Ангела Канчева (Болгарія);

Келбаса Павел, доктор наук, професор, Краківський аграрний університет імені Гуго Коллонтая (Польща);

Керницький Іван, д. т. н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»;

Конєчний Річард, доктор наук, професор, Академія імені Якуба з Парадижу (Польща);

Крушельницька Вероніка, доктор наук, Бидгощська Політехніка (Польща);

Левонюк Віталій, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Луб Павло, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Лула Павел, доктор наук, професор, Краківський економічний університет (Польща);

Ляшук Олег, д. т. н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;

Мірошник Олександр, д. т. н., професор, Державний біотехнологічний університет;

Медиковський Микола, д. т. н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»;

Оліскевич Мирослав, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

Приставка Мирослав, доктор наук, Словацький університет сільського господарства в Нітрі (Словаччина);

Пташник Вадим, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Радомська-Залас Александра, доктор наук, Академія імені Якуба з Парадижу (Польща);

Роговський Іван, д. т. н., професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Самборський Сильвестр, д. т. н., професор, Люблінська Політехніка (Польща);

Сиротюк Сергій, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Сукач Олег, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

Ткачук Ростислав, д. т. н., професор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;

Томпоровський Анджей, д. т. н., професор, Бидгощська Політехніка (Польща);

Тригуба Анатолій, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

Тюрбан Ян, доктор наук, професор, Університет Нови-Сад (Сербія);

Фіндура Павол, доктор наук, професор, Словацький університет сільського господарства в Нітрі (Словаччина);

Харченко Сергій, д. т. н., професор, Полтавський державний аграрний університет;

Чабан Андрій, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

Швець Олексій, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування.

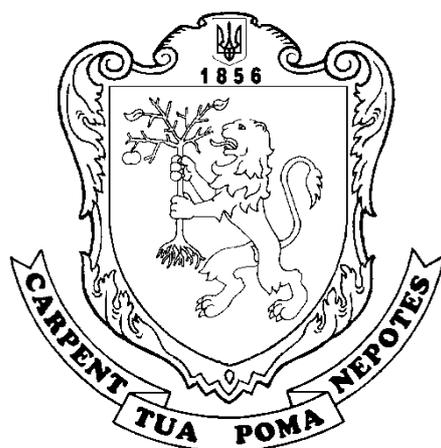
Засновник: Львівський національний університет природокористування

Періодичність видання: 1 раз на рік

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
LVIV NATIONAL ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

BULLETIN
OF LVIV NATIONAL
ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

Agroengineering research
№ 29



Lviv 2025

Bulletin of Lviv National Environmental University. Series «Agroengineering research». 2025. № 29. 260 p.

The Bulletin presents results of theoretical and experimental researches as well as reviews in the field of agroengineering on the following issues: studies of the properties of agricultural materials and soils; scientific principles of designing new machines and technologies; mechanization and automation of the processes and operations of agro-industrial production; modern technologies and technological processes of industrial engineering; reliability and efficient technical service of machines; power engineering (particularly renewable energy); application of information systems in agroengineering, as well as project and program management; simulation of processes, technological and production systems (cultivation, transportation, storage, primary processing of agricultural products); engineering aspects of environmental safety and labor safety in agro-industrial production.

Intended for researchers, specialists in agro-industrial production, graduate students and masters, as well as students of engineering specialties.

*Recommended for publication by the Academic Council
of Lviv National Environmental University
(minutes No. 9 dated 26.02.2025 p.)*

EDITORIAL BOARD:

Kovalyshyn Stepan, Candidate of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (editor-in-chief);

Vlasovets Vitaliy, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (deputy editor);

Babych Mykhailo, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (executive secretary);

Aleksiejuk-Gawron Joanna, PhD, Warsaw University of Life Sciences, Poland;

Beloev Ivan, PhD, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;

Bratishko Viacheslav, Doctor of Technical Sciences, professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;

Walowski Grzegorz, PhD, Institute of Technology and Life Sciences, Poland;

Hnatov Andrii, Doctor of Technical Sciences, professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;

Golimowski Wojciech, PhD, professor, Wrocław University of Economics and Business, Poland;

Horbai Orest, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

Horodetskyi Ivan, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Humeniuk Ruslan, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Faruk Güner, PhD, professor, Giresun University, Turkey;

Danchenko Olena, Doctor of Technical Sciences, professor, Cherkasy State Technological University, Ukraine;

Zubko Vladyslav, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Sumy National Agrarian University, Ukraine;

Kangalov Plamen, PhD, professor, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;

Kielbasa Pawel, PhD, professor, University of Agriculture in Krakow, Poland;

Kernytskyi Ivan, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

Kovalchik Yuriy, Ph.D., Professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Konieczny Ryszard, PhD, professor, Jacob of Paradies University, Poland;

Kruszelnicka Weronika, PhD, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;

Levoniuk Vitaliy, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Lub Pavlo, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Lula Pawel, PhD, professor, Cracow University of Economics, Poland;

Liashuk Oleh, Doctor of Technical Sciences, professor, Ternopil Ivan Pului National Technical University, Ukraine;

Miroshnyk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, professor, State Biotechnological University, Ukraine;

Medykovskyi Mykola, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

Oliskevych Myroslav, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Prístavka Miroslav, PhD, professor, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;

Ptashnyk Vadym, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Radomska-Zalas Aleksandra, PhD, Jacob of Paradies University, Poland;

Rohovskyi Ivan, Doctor of Technical Sciences, professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;

Samborski Sylwester, Doctor of Technical Sciences, professor, Lublin University of Technology, Poland;

Syrotiuk Serhii, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Sukach Oleh, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Tkachuk Rostyslav, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine;

Tomporowski Andrzej, Doctor of Technical Sciences, professor, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;

Tryhuba Anatolii, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Turan Jan, PhD, professor, University of Novi Sad, Serbia;

Findura Pavol, PhD, professor, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;

Kharchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, professor, Poltava State Agrarian University, Ukraine;

Chaban Andrii, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

Shvets Oleksii, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine.

ЗМІСТ

Розділ 1

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ

<i>Прохоренко М., Прохоренко С., Марчук Б., Лозинський В., Мороз М., Мідик А.-В., Лиса О., Семерак В.</i> Математичне моделювання змін вологості ґрунту з урахуванням імпульсних впливів у цифровому землеробстві	9
---	---

Розділ 2

МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

<i>Коруняк П., Шеремета Р., Березовецький С., Швець О.</i> Дистанційне налаштування робочих режимів інерційного приводу вібраційних машин для оброблення деталей	16
<i>Семен Я., Крупич О., Семен О.</i> Статична взаємодія пальців вилки і зубка часнику	22
<i>Тригуба А., Шарибура А., Гошко З., Левчук О., Барабаш Р.</i> Вплив конструктивних параметрів агродронів на тривалість їхнього польоту	27

Розділ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Тригуба А., Фількін О.</i> Технологія миття сільськогосподарської техніки та метод оцінювання його ефективності за різних рівнів забруднення	34
<i>Крайник Л., Сивулька П.</i> Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики	48
<i>Кіхтан А., Налесник Д.</i> Гібридний привід вантажопасажирського автомобіля «Мамай-2» для бездоріжжя	57
<i>Хома В.</i> Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки	64

Розділ 4

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

<i>Гошко М., Гошко Т., Дробот І.</i> Дослідження характеристик світлодіодних джерел світла	70
<i>Хімка С., Сукач О., Магац М., Габріель Ю., Дуфанець І., Мельников Т.</i> Оцінювання придатності електромобілів для локальної експлуатації на основі інтегрального показника	79
<i>Radek P., Wałowski G., Syrotyuk S., Halchak V., Stanytskyu T., Syrotyuk H.</i> Wind turbines and farms using AI for energy storage	87

Розділ 5

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

<i>Левонюк В., Гречин Д., Михайлович Т.</i> Порівняльний аналіз схем заміщення для ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії	94
<i>Марущак Я., Дробот І., Гречин Д.</i> Обґрунтування характеристик діагностування експлуатаційних показників стоякових підшипників турбогенераторів	105
<i>Марущак Я., Дробот І., Гречин Д.</i> Порівняльний аналіз способів реалізації інтегровано-диференціальних регуляторів дробового порядку	112
<i>Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Левус Р.</i> Вибір типу електроприводу для механізму із систематичним недовантаженням	117

Розділ 6
НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

<i>Зачек О., Мідик А.-В., Лиса О., Пташник В.</i> Розроблення цифрового годинника-термометра на платформі Arduino з індикацією на MAX7219	122
<i>Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т., Бойко М.</i> Теоретичні дослідження впливу кінематики на робочий процес безшатунного двигуна	133
<i>Буртак В., Кохана Т., Барабаш Р.</i> Аналіз методик оцінки міцності конструкційних матеріалів робочих елементів подрібнювальних машин за тріщиностійкістю	141
<i>Пономаренко О., Бурнаєв О., Семерак В., Гавриляк О.</i> Математичне моделювання напруженого стану в широких стрижнях з двома круговими отворами за чистого зсуву	145
<i>Швець О., Коруняк П., Березовецький С., Городецький І., Шеремета Р.</i> Дослідження синергетичного ефекту під час налаштування джерела зварювального струму інверторного типу з мікропроцесорним керуванням на прикладі зварювального апарата TPS 2700СМТ	151

Розділ 7
МОДЕЛЮВАННЯ МАШИН, ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Бурнаєв О., Семерак В., Пономаренко О., Городецький І., Лиса О.</i> Математичне моделювання теплопередачі в робочій зоні борошномельного вальця	161
<i>Семерак М., Семерак В., Бубняк Т., Бурнаєв О., Пономаренко О., Говда О.</i> Математичне моделювання процесів теплопередачі в зоні тертя шорстких поверхонь	166
<i>Семерак В., Семерак М.</i> Математичне моделювання термопружного стану ізотропного півпростору під дією фрикційного джерела тепла	172
<i>Прогній П., Шевчук В., Попович П., Розум Р., Буряк М., Папінко А.</i> Математична модель дослідження стійкості автопоїздів на гальмівних режимах	179

Розділ 8
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ.
УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Тригуба А., Тригуба І., Маланчук О., Коциловський М., Коваль Л., Андрушків О., Олійник Р.</i> Інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад	185
<i>Станько В., Пташник В., Квасниця Т., Железняк А., Смолінський В., Станько С.</i> Використання штучного інтелекту в освітніх проєктах та цифровій трансформації університетів: досвід інтеграції ШІ-бота на базі OPENAI	198
<i>Тригуба А., Коваль Л., Татомир А., Боярчук О., Падюка Р., Станько В.</i> Ефективність методів об'єктно-орієнтованого програмування і патернів для планування сільських рятувальних формувань	208
<i>Железняк А., Падюка Р., Дзьоба Х.</i> Проєктування веборієнтованої системи підтримки клієнтів в аграрній сфері	218
<i>Луб П., Фіялковський В., Чухрай Л., Штогрин С., Стефанишин В.</i> Моделювання продуктивності RESTful API: алгоритми обробки запитів і аналіз даних	225
<i>Заплатинський Н., Фіялковський В., Штогрин С., Квасниця Т., Татомир А.</i> Алгоритмічні методи паралельної обробки великих даних у системах прогнозної аналітики	232
<i>Ткаченко Ф.</i> Концептуальна модель протиризикового управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях «7S+R»	242

Розділ 9
ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

<i>Городецький І., Тимочко В., Окіпний І., Швець О., Бурнаєв О., Семерак В.</i> Аналіз динаміки основних видів подій нещасних випадків, гострих професійних захворювань (отруєнь) і аварій	249
--	-----

CONTENT

Chapter 1 **PHYSICAL, MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS, AGRICULTURAL AND RAW MATERIALS**

- Prokhorenko M., Prokhorenko S., Marchuk B., Lozynskyi V., Moroz M., Midyk A.-V., Lysa O., Semerak V.*
Mathematical modeling of soil moisture changes considering impulse effects in digital agriculture9

Chapter 2 **MACHINES AND OPERATIONAL PROCESSES OF AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION**

- Koruniak P., Sheremeta R., Berezovetskyi S., Shvets O.* Remote adjustment of operating modes
of the inertial drive in vibratory machines for part processing16
- Semen Ya., Krupych O., Semen O.* Static interaction between the tines of a fork and a garlic clove22
- Tryhuba A., Sharybura A., Hoshko Z., Levchuk O.* Barabash R. Influence of structural parameters
of agricultural drones on their flight duration27

Chapter 3 **TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EFFICIENT MACHINE USE IN AGROENGINEERING**

- Tryhuba A., Filkin O.* Technology for washing agricultural machinery and a method for evaluating
its effectiveness at different levels of contamination.....34
- Krainyk L., Syvulka P.* Agroecological assessment of machine-tractor units based
on WES methodology.....48
- Kikhtan A., Nalesnyk D.* Hybrid drive of the "Mamai-2" cargo-passenger off-road vehicle57
- Khoma V.* Experimental studies of the influence of separate tire pressure regulation
on the bearing mobility parameters of automotive vehicles64

Chapter 4 **POWER ENGINEERING OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

- Hoshko M., Hoshko T., Drobot I.* Research on the characteristics of LED light sources70
- Khimka S., Sukach O., Mahats M., Habriiel Yu., Dufanets I., Melnykov T.* Assessment
of electric vehicles suitability for local operation based on the integral indicator79
- Radek P., Walowski G., Syrotyuk S., Halchak V., Stanytskyy T., Syrotyuk H.* Wind turbines
and farms using AI for energy storage87

Chapter 5 **ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS IN AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION**

- Levoniuk V., Hrechyn D., Mykhailovych T.* Comparative analysis of equivalent circuit models
for boundary condition identification in the wave equation of a long transmission line94
- Marushchak Ya., Drobot I., Hrechyn D.* Justification of the characteristics
of diagnosing operational indicators of turbine generator standoff bearings105
- Marushchak Ya., Drobot I., Hrechyn D.* Comparative analysis of the methods
for implementing fractional-order integrator-differentiator controllers112
- Hrechyn D., Drobot I., Hoshko M., Levus R.* Selecting the type of electric drive
for a mechanism with systematic underloading117

Chapter 6
RELIABILITY AND TECHNICAL MAINTENANCE OF MACHINES

<i>Zachek O., Midyk A.-V., Lysa O., Ptashnyk V.</i> Development of a digital clock-thermometer on the Arduino platform with MAX7219 display	122
<i>Kolesnikova T., Lykhodii O., Makhorkina T., Boiko M.</i> Theoretical studies on the influence of kinematics on the workflow of a crankless engine	133
<i>Burtak V., Kokhana T., Barabash R.</i> Analysis of methods for assessing the strength of structural materials of working elements of grinding machines in terms of crack resistance	141
<i>Ponomarenko O., Burnaiev O. Semerak V., Havryliak O.</i> Mathematical modeling of the strained state in broad pivots with two circular holes by crook	145
<i>Shvets O., Koruniak P., Berezovetskyi S., Horodetskyi I., Sheremeta R.</i> Study of the synergistic effect when setting up an inverter-type welding current source with microprocessor control using the example of the TPS 2700SMT welding machine	151

Chapter 7
**MODELING OF MACHINES, PROCESSES, AND SYSTEMS
IN AGRICULTURAL ENGINEERING**

<i>Burnaiev O., Semerak V., Ponomarenko O., Horodetskyi I., Lysa O.</i> Mathematical modeling of heat transfer in the working zone of a flour mill roller	161
<i>Semerak M., Semerak V., Bubniak T., Burnaiev O., Ponomarenko O., Hovda O.</i> Mathematical modeling of heat transfer processes in the friction zone of rough surfaces	166
<i>Semerak V., Semerak M.</i> Mathematical modeling of the thermoelastic state of an isotropic half-space under the influence of a frictional heat source	172
<i>Prohni P., Shevchuk V., Popovych P., Rozum R., Buriak M., Papinko A.</i> Mathematical model for researching the stability of road trains during braking modes	179

Chapter 8
**INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS.
PROJECT MANAGEMENT IN AGROENGINEERING**

<i>Tryhuba A., Tryhuba I., Malanchuk O., Kotsylovskyi M., Koval L., Andrushkiv O., Oliinyk R.</i> Intellectual models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities	185
<i>Stanko V., Ptashnyk V., Kvasnytsia T., Zhelyeznyak A., Smolinskyi V., Stanko S.</i> Using artificial intelligence in educational projects and the digital transformation of universities: experience of integrating an AI chatbot based on OpenAI	198
<i>Tryhuba A., Koval L., Tatomyr A., Boiarchuk O., Padiuka R., Stanko V.</i> Effectiveness of object-oriented programming methods and patterns for planning rural rescue teams	208
<i>Zhelyeznyak A., Padiuka R., Dzioba Kh.</i> Approaches to designing a web-based customer support system for the agricultural sector	218
<i>Lub P., Fialkovskyi V., Chukhrai L., Shtohryn S., Stefanyshyn V.</i> RESTful API performance modeling: request processing algorithms and data analysis	225
<i>Zaplatynskyi N., Fialkovskyi V., Shtrohryn S., Kvasnytsia T., Tatomyr A.</i> Algorithmic methods of parallel processing of big data in predictive analytics systems	232
<i>Tkachenko F.</i> Conceptual model of risk-oriented business process management in 7S+R engineering companies	242

Chapter 9
**ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND AGRO-INDUSTRIAL
PRODUCTION SAFETY**

<i>Horodetskyi I., Tymochko V., Okipnyi I., Shvets O., Burnaiev O., Semerak V.</i> Analysis of the dynamics of the major types of workplace accidents, acute occupational diseases (such as poisonings), and other incidents	249
--	-----

Розділ 1

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ

УДК 631.635

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ З УРАХУВАННЯМ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ У ЦИФРОВОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ

*Мирослава Прохоренко, к. ф.-м. н., Сергій Прохоренко, д. т. н., Богдан Марчук,
Віктор Лозинський, к. т. н.*

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: myroslava.v.prokhorenko@lpnu.ua; serhii.v.prokhorenko@lpnu.ua;
bohdan.marchuk.tsz.2024@lpnu.ua; viktor.a.lozynskyi@lpnu.ua*

Микола Мороз, д. ф.-м. н.

*Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна 11, м. Рівне, Україна, e-mail: m.v.moroz@niwmt.edu.ua*

Андрій-Володимир Мідик, к. т. н.

*Львівський державний університет внутрішніх справ,
вул. Гороδοцька, 26, м. Львів, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: andriy31194@gmail.com*

Ольга Лиса, к. т. н., Віктор Семерак, к. т. н.

*Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ovl2407@ukr.net; semerakviktor@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.9-15>

Прохоренко М., Прохоренко С., Марчук Б., Лозинський В., Мороз М., Мідик А.-В., Лиса О., Семерак В.
Математичне моделювання змін вологості ґрунту з урахуванням імпульсних впливів у цифровому землеробстві

Однією з ключових тем, що потребує уваги в рамках точного землеробства, є контроль вологості ґрунту. Цей показник безпосередньо впливає на рівень урожайності, ефективність використання водних ресурсів, а також на загальний стан агроєкосистеми. Якщо вологи недостатньо, можна зіткнутися зі значним зниженням урожайності, а надмірна волога може спричинити вимивання важливих поживних речовин та навіть ерозію ґрунту. Тому дуже важливо розуміти, як змінюється вологість під впливом різних факторів – опадів, випаровування, інфільтрації та споживання рослинами. Для покращення агропрактик важливо розробити ефективні математичні моделі, які сприятимуть аналізу змін вологості ґрунту. Це, у свою чергу, дозволить точно визначити необхідність додаткового зрошення в оптимальні терміни.

Сформовано математичну модель змін динаміки вологості ґрунту з урахуванням поливу у вигляді імпульсної дії, що дозволяє встановити оптимальні моменти для зрошення, а отже – підвищити ефективність водокористування в точному землеробстві. Методика та результати полягають у застосуванні диференціального рівняння з імпульсною дією для врахування імпульсного зрошування за умов досягнення необхідного рівня осушеності (тобто дезволожування). Визначено (для представників різних типів ґрунтів) часові моменти досягнення критичних рівнів вологості, що потребують впровадження імпульсу зрошення. Модель, представлена в дослідженні, може бути використана для автоматизованого керування зрошувальними системами, оцінки ефективності утримання вологи в різних типах ґрунтів, а також для оптимізації агротехнічних заходів у точному землеробстві. Наукова новизна та практична значущість полягають у запропонованій імпульсній математичній моделі динаміки вологості, що дозволяє точно формалізувати моменти необхідного поливу. Результати можна використати для створення систем автоматизованого управління зрошенням у точному землеробстві, зменшуючи перевитрати води та підвищуючи урожайність.

Ключові слова: моделювання вологості, імпульсне зволоження, диференціальні рівняння.

Prokhorenko M., Prokhorenko S., Marchuk B., Lozynskyi V., Moroz M., Midyk A.-V., Lysa O., Semerak V.
Mathematical modeling of soil moisture changes considering impulse effects in digital agriculture

One of the key topics requiring attention within the framework of precision agriculture is soil moisture control. This parameter directly affects crop yield levels, the efficiency of water resource utilization, and the overall condition of the agroecosystem.

Insufficient moisture can significantly reduce yield, while excessive moisture can cause nutrient leaching and even soil erosion. Therefore, it is crucial to understand how soil moisture changes under the influence of various factors, such as precipitation, evaporation, infiltration, and plant uptake. To improve agricultural practices, it is important to develop effective mathematical models that facilitate the analysis of soil moisture dynamics. This, in turn, will enable accurate determination of the need for additional irrigation at optimal times.

The aim of this work is to form a mathematical model of changes in soil moisture dynamics taking into account irrigation in the form of pulse action, which allows to establish optimal time for irrigation, and therefore - to increase the efficiency of water use in precision agriculture. Methodology and results consist in the application of a differential equation with pulse action to consider pulse irrigation under the conditions of achieving the required level of drainage (i.e. dehumidification). The time points of reaching critical moisture levels that require the introduction of an irrigation pulse have been determined (for samples of different types of soils). The model presented in the work can be used for automated control of irrigation systems, assessment of the efficiency of moisture retention in different types of soils, as well as for optimization of agrotechnical measures in precision agriculture. Scientific novelty and practical significance lie in the proposed pulse mathematical model of moisture dynamics, which allows to accurately formalize the moments of necessary irrigation. The results can be used to create automated irrigation control systems in precision agriculture, reducing water waste and increasing yields.

Keywords: humidity modeling, pulse humidification, differential equations.

Постановка проблеми. Точне землеробство стало однією з найважливіших складових у сучасному аграрному виробництві. Сьогодні цифрові технології, геоінформаційні системи (ГІС) та супутниковий моніторинг стають невід'ємною частиною процесу вирощування сільськогосподарських культур. Це дозволяє не тільки підвищити ефективність виробництва, а й забезпечити стійке використання природних ресурсів.

Однією з ключових тем, що потребує уваги в рамках точного землеробства, є контроль вологості ґрунту [5; 7; 8; 9]. Цей показник безпосередньо впливає на рівень урожайності, ефективність використання водних ресурсів, а також на загальний стан агроєкосистеми. Якщо вологи недостатньо, можна зіткнутися зі значним зниженням урожайності, а надмірна волога може спричинити вимивання важливих поживних речовин та навіть ерозію ґрунту. Тому дуже важливо розуміти, як змінюється вологість під впливом різних факторів – опадів, випаровування, інфільтрації та споживання рослинами.

Для покращання агропрактик важливо розробити ефективні математичні моделі, які сприятимуть аналізу змін вологості ґрунту. Це, у свою чергу, дозволить точно визначити необхідність додаткового зрошення в оптимальні терміни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у галузі моделювання вологості ґрунту та імпульсних впливів на зрошення проводила низка вчених. Наприклад, у [14] детально представлено концептуальні основи управління поливами при зрошенні з використанням систем підтримки прийняття рішень. На підставі аналізу та досліджень, проведених як вітчизняними, так і закордонними авторами, доведено, що ефектив-

ність управління поливами значною мірою залежить від методологічних підходів, застосовуваних для визначення строків і норм поливу в різних системах підтримки прийняття рішень. Обґрунтовано, що реалізація таких зрошувальних режимів можлива лише за умови використання систем підтримки ухвалення рішень із впровадженням геоінформаційних технологій. У цих системах поєднуються гідрогеологічні моделі розрахунку та прогнозування строків і норм поливу, що ґрунтуються на потенціалі ґрунтової вологи як критерію рівня вологозабезпечення, а також доступності цієї вологи для рослин у сполученні з даними дистанційного зондування землі (ДЗЗ).

У [2] представлено двовимірне математичне моделювання водного режиму ґрунту за краплинного зрошення. Розроблено методику прогнозування динаміки вологості ґрунту за краплинного зрошення на основі математичного моделювання згідно з рівнянням Річардса у термінах напорів у двовимірній постановці.

Моделювання водного режиму ґрунту та водного балансу в експерименті з пересаджуванням рису за умов зменшеного зрошення розглянуто у [12; 13].

Математичні моделі фільтраційних процесів у [3] проаналізовано з метою вивчення поведінки ґрунтових вод в екологічних (паводки, підтоплення територій) та технологічних (видобування сланцевого газу) аспектах. Для опису вказаних процесів використано моделі Дарсі та Форхгеймера із сталими коефіцієнтами, реалізований чисельний метод розв'язання відповідних систем.

У праці [16] здійснено математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод з урахуванням впливу штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірації.

Постановка завдання. Наше завдання – побудова математичної моделі зміни динаміки вологості ґрунту з урахуванням імпульсних поливів, що описується диференціальним рівнянням з імпульсною дією [15]; отримання аналітичного розв’язку, який описує поведінку вологості між імпульсами та визначає момент часу, коли необхідно виконати полив.

Модель, представлена в дослідженні, може бути використана для автоматизованого керування зрошувальними системами, оцінки ефективності утримання вологи в різних типах ґрунтів, а також для оптимізації агротехнічних заходів у точному землеробстві. Запропонована модель орієнтована насамперед на культури з контрольованим зрошенням (овочеві культури, ягідники, сади, газони), де критичні пороги вологості добре формалізовані та контролюються автоматизованими системами.

Отже, необхідно аналітично записати зміну динаміки вологості ґрунту з урахуванням імпульсних поливів та знаходження часового моменту поливу.

Виклад основного матеріалу. Для виведення диференціального рівняння, що описує зміну вологості ґрунту $W(t)$ [1, с. 67] з урахуванням імпульсної дії, скористаємось основним балансом води в ґрунті:

$$\frac{dW}{dt} = P(t) - E(t) - R(t),$$

де: $W(t)$ – вологість ґрунту, [мм] води в ґрунті; $P(t)$ – надходження вологи (опаді, полив) [мм/год]; $E(t)$ – випаровування, [мм/год]; $R(t)$ – поверхневий стік [мм/год].

Припустимо, що втрати вологи відбуваються пропорційно поточній вологості:

$$E(t) + R(t) = \lambda \cdot W(t), \quad \lambda > 0,$$

де λ – узагальнений коефіцієнт швидкості втрат вологості [день⁻¹].

Якщо припустити, що випаровування та інфільтрація відбуваються пропорційно вологості W , а надходження води здійснюється у вигляді імпульсних впливів (тобто зрошення в певні моменти часу, коли вологість досягає певного критичного значення W_{\min}), то математичну модель такого процесу можна записати у вигляді:

$$\frac{dW}{dt} = \lambda W(t), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (1)$$

$$W(t_0) = W_0 \quad (2)$$

де W_0 – початковий (встановлений нами) рівень вологості. Тоді:

$W(t+0) - W(t-0) = I_0$, коли $W(t-0) = W_{\min}$ (3)
 W_{\min} [мм] – критичний рівень вологості ґрунту, при якому необхідне втручання; I_0 [мм] – величина додаткової подачі води у часові моменти, коли рівень вологості досягнув критичного W_{\min} .

Споживання води рослинами не виділяється в окремих доданок, а входить до узагальненого коефіцієнта втрат вологості λ , який інтегрує евапотранспірацію, інфільтраційні втрати, водоспоживання рослин. Такий підхід відповідає першому рівню математичного моделювання, коли система описується з мінімальною кількістю параметрів. Коефіцієнт λ має чітку фізичну інтерпретацію – інтегральна швидкість втрат вологості ґрунту (обернена характерному часу висихання). Розмірність [день⁻¹] означає частку вологи, що втрачається за одиницю часу.

Розв’язки задачі (1)-(3) поділяються на дві групи: без імпульсної дії, з імпульсами – якщо вологість зменшується та досягає критичного рівня. Імпульси можуть здійснюватися: один раз – якщо після підливу система не повернеться до W_{\min} ; нескінченну кількість разів – якщо після кожного підливу вологість знову спадає до критичного рівня. Останній випадок є найбільш значущим для автоматизації.

Розв’язки задачі (1)-(3) можна поділити на два типи:

1) такі, що не зазнають імпульсного впливу.

У такому разі полив не відбувається, оскільки вологість у початковий момент часу нижча за значення W_{\min} . Це можливо для випадків:

– якщо $W_0 < W_{\min}$ та коефіцієнт $\lambda < 0$;

– якщо $W_0 \geq W_{\min}$ та коефіцієнт $\lambda > 0$;

2) такі, що зазнають імпульсної дії.

У такому разі вологість з плином часу зменшується і в певний момент досягає значення W_{\min} . Це можливо:

– якщо $W_0 < W_{\min}$ та коефіцієнт $\lambda > 0$;

– якщо $W_0 \geq W_{\min}$ та коефіцієнт $\lambda < 0$.

Більше того, після виконання однієї з умов пункту 2) імпульсна дія (тобто полив) здійснюватиметься один раз:

– якщо $W_0 < W_{\min}$, коефіцієнт $\lambda > 0$ та $I_0 > W_{\min}$;

– якщо $W_0 \geq W_{\min}$, коефіцієнт $\lambda < 0$ та $I_0 < W_{\min}$ або полив відбуватиметься нескінченну кількість разів:

– якщо $W_0 < W_{\min}$ в умові (2), коефіцієнт $\lambda > 0$ та $I_0 < W_{\min}$;

– якщо $W_0 \geq W_{\min}$ в умові (2), коефіцієнт $\lambda < 0$ та $I_0 > W_{\min}$.

Цікавий для розгляду варіант, коли імпульсна дія (імпульсний полив) здійснюється нескінченну кількість разів. Розглянемо випадок, коли в умові (2) $W_0 \geq W_{\min}$, у рівнянні (1) коефіцієнт $\lambda < 0$ та $I_0 > W_{\min}$.

Отже, побудуємо розв'язки задачі (1)-(3), що описує зміну вологості ґрунту з урахуванням її поступового зменшення внаслідок випаровування, та поливів (імпульсів), у моменти, коли вологість досягла критичного значення. Тобто розглядаємо диференціальне рівняння, яке описує процес зменшення вологості між імпульсами, а також умову, яка задає стрибок (імпульс) вологості в момент надходження води. Запишемо загальний розв'язок задачі (1)-(3) та формулу, з якої можна знайти часовий момент, коли необхідно полити, що дозволить, аналізуючи погодні умови, планувати полив. Результати досліджень сформулюємо у вигляді леми.

Лема. Розв'язок $W(t)$ задачі з імпульсною дією (1)-(3) для $t \in [t_k, t_{k+1})$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), коли $W_0 \geq W_{\min}$ в умові (2), коефіцієнт $\lambda < 0$ та $I_0 > W_{\min}$ має вигляд

$$W(t) = W_{\min} e^{\lambda(t-t_0)} + I_0 \sum_{j=1}^k e^{\lambda(t-t_j)}, \quad (4)$$

моменти часу t_{k+1} визначаються з рівняння

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= t_k + \frac{1}{\lambda} \ln \left| \frac{W_{\min}}{W_{\min} + I_0} \right| = \\ &= t_1 - \frac{k}{\lambda} \ln \left| 1 + \frac{I_0}{W_{\min}} \right|, \quad k = 1, 2, \dots \\ t_1 &= t_0 + \frac{1}{\lambda} \ln \left| \frac{W_{\min}}{W_0} \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

Доведення. Розв'язок задачі (1)-(3) для $t \in [t_0, t_1)$ має вигляд

$$W(t) = W_0(t) e^{\lambda(t-t_0)}$$

Експоненціальний закон зміни вологості широко застосовується в агрогідрологічних моделях як лінійне наближення процесів евапотранспірації та інфільтрації за умови сталих зовнішніх факторів.

Часовий момент t_1 першої імпульсної дії, тобто момент першого поливу, знаходимо з рівняння

$$W_0 e^{\lambda(t_1-t_0)} = W_{\min}, \quad (6)$$

звідки

$$t_1 = t_0 + \frac{1}{\lambda} \ln \left| \frac{W_{\min}}{W_0} \right|.$$

Розв'язок рівняння (6) впливає з того, що згідно з постановкою задачі $\lambda < 0$ та $W_0 \geq W_{\min}$.

З урахуванням умови (3) розв'язуємо (1) з початковими даними:

$$W(t) = W_0 e^{\lambda(t-t_0)} + I_0$$

та одержуємо розв'язок задачі (1)-(3) для $t \in [t_1, t_2)$:

$$W(t) = W_{\min} e^{\lambda(t-t_0)} + I_0 e^{\lambda(t-t_1)}.$$

Знаходимо наступний момент імпульсної дії t_2 ($t_2 > t_1$) із співвідношення

$$W_{\min} e^{\lambda(t_2-t_0)} + I_0 e^{\lambda(t_2-t_1)} = W_{\min}.$$

Після перетворень одержимо

$$t_2 = t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln \left| 1 + \frac{I_0}{W_{\min}} \right|. \quad (7)$$

З того, що $\lambda < 0$ та $I_0 > W_{\min}$, співвідношення (7) логічне.

Тоді, для $t \in [t_2, t_3)$ розв'язок задачі (1)-(3) запишемо за допомогою співвідношення

$$W(t) = W_{\min} e^{\lambda(t-t_0)} + I_0 \sum_{j=1}^2 e^{\lambda(t-t_j)},$$

а момент часу для знаходження t_3 знаходимо з

$$t_3 = t_2 + \frac{1}{\lambda} \ln \left| \frac{W_{\min}}{W_{\min} + I_0} \right| = t_1 - \frac{2}{\lambda} \ln \left| 1 + \frac{I_0}{W_{\min}} \right|. \quad (8)$$

Продовжуючи міркування далі, переконуємося у справедливості формул (4) та (5). А моменти імпульсів формують послідовність (4) часо-періодичних осциляцій рівня вологості, яка повністю контрольована трьома параметрами: λ , W_{\min} , I_0 .

Розглянемо вологість $W(t)$, аналізуючи, для зручності її зміни у [%] та (для наочності) застосовуючи як стартову точку первинний (встановлений нами) рівень вологості W_0 [%], відзначений після того, як ми здійснили полив на I_0 [%] (рис. 1).

Як приклад, покажемо модель для різних параметрів: λ [день⁻¹]. Таке (конкретне) значення інтенсивності випаровування та інфільтрації є модельним (абстрактним) коефіцієнтом, але їх порядок величин узгоджується з діапазонами для вказаних типів ґрунтів у наданій таблиці, реальні ж значення регіонально та темпорально залежні, зокрема від температури, вологості повітря, мульчування тощо, та зазвичай визначаються експериментально.

Утім конкретні обрані значення (табл.) містяться в характеристичному діапазоні для цих ґрунтів та обрані на основі аналізу джерел [4; 6; 10; 11].

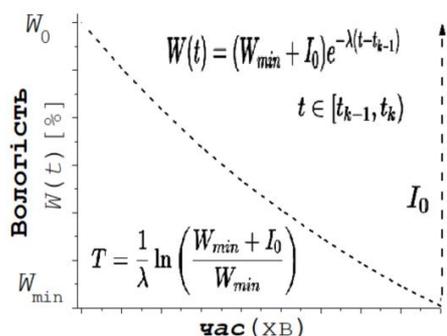


Рис. 1. Схема базової моделі змін вологості

$W(t) = W_0 \cdot e^{-\lambda(t-t_{k-1})}$ при імпульсному підливі на $t \in [t_0, t_{k-1})$ I_0 , що відбуватиметься при досягненні значень W_{min} із періодом T

Fig. 1. Scheme of the basic model of moisture dynamics

$W(t) = W_0 \cdot e^{-\lambda(t-t_{k-1})}$ under pulse irrigation at $t \in [t_0, t_{k-1})$ intensity I_0 , which is triggered when the soil moisture level reaches W_{min} with a period T

Значення λ , наведені в таблиці, не є експериментальними константами, а модельними параметрами, вибраними в характерних діапазонах для відповідних типів ґрунтів згідно з літературними даними. λ є узагальненим параметром; конкретні значення треба уточнювати експериментально для кожного регіону.

Використаємо дві форми подання вологості ґрунту: абсолютна – у вигляді еквівалентного шару води (мм), що застосовується при аналітичному виведенні математичної моделі, та відносна – у відсотках (%), яка використовується для наочного представлення результатів моделювання.

Перехід від абсолютної вологості $W(t)$ [мм] до відносної вологості $w(t)$ [%] здійснюється шляхом нормування відносно максимальної вологості ґрунту W_{max} [мм] за формулою:

$$w(t) = \frac{w(t)}{w_{max}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Відповідно, зворотне перетворення має вигляд:

$$W(t) = \frac{w(t)}{100} \cdot W_{max} \quad (10)$$

де: $W(t)$ – абсолютна вологість ґрунту, мм; $w(t)$ – відносна вологість ґрунту, %; W_{min} , w_{min} – відповідно, критичні рівні вологості в абсолютній та відносній шкалах.

Величина імпульсного зрошення I_0 у фізичному сенсі відповідає додатковому шару води, який вноситься у ґрунт у момент поливу, та в абсолютній шкалі має розмірність [мм]. При переході до відсоткової шкали імпульс зрошення нормується аналогічно та визначається як:

$$i_0 = \frac{I_0}{w_{max}} \cdot 100\% \quad (11)$$

де i_0 – відносна величина імпульсного зволоження, %.

Використання відсоткової шкали – лише форма представлення результатів і не змінює структури диференціального рівняння та умов імпульсної дії, а всі параметри моделі мають чітке фізичне тлумачення та однозначний взаємозв'язок між абсолютною і відотною формами подання вологості ґрунту.

Розглянемо випадок, коли $w_{min} = 20\%$ – критичний рівень вологості, за якого потрібен імпульс. $i_0 = 30\%$ – величина імпульсного зрошення, однакова для всіх режимів.

Модель може бути адаптована під різні типи культур шляхом налаштування параметрів моделі (критичний рівень вологості W_{min} , величина імпульсу I_0 , коефіцієнт втрат λ).

Моделювання зміни вологості ґрунту виконане на основі розробленої математичної моделі, яка описує процес висихання ґрунту у проміжках між поливами та враховує імпульсну дію зрошення у моменти, коли вологість досягає критичного рівня W_{min} .

Для чисельного аналізу модель реалізовано у двох формах:

У абсолютних одиницях

$$\frac{dW}{dt} = \lambda W(t), t \in [t_0, +\infty)$$

У відсотковій формі

$$\frac{dw}{dt} = \lambda w(t), t \in [t_0, +\infty).$$

Таблиця. Значення інтенсивності випаровування та інфільтрації для вказаних типів ґрунтів

Table. Values of evaporation intensity and infiltration for the specified soil types

Характеристика режиму	λ [день ⁻¹]	Тип ґрунту	Період T [хв]
Інтенсивне випаровування	14.4	Піщані, супіщані	91.6
Стандартні умови	7.2	Суглинки, легкі глинисті	183.2
Повільне висихання	2.88	Глинисті, торф'яні	458

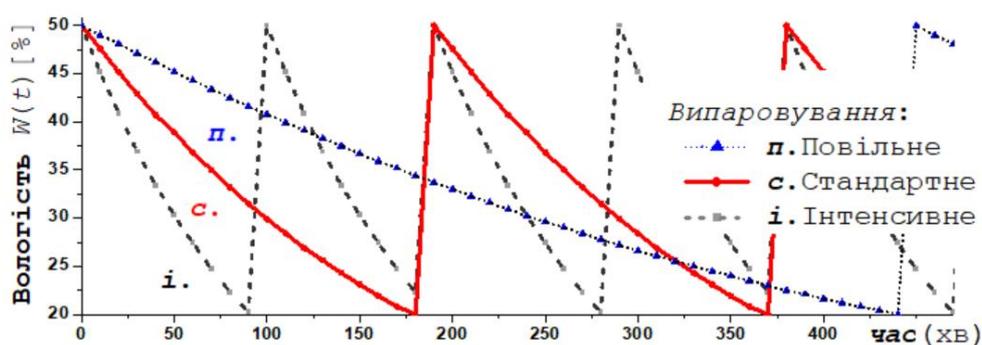


Рис. 2. Значення вологості $w(t)$ для трьох режимів випаровування, де, якщо вологість досягає $w_{\min} = 20\%$, то виконується імпульс зволоження i_0 , зумовлюючи стрибоку зміну вологості до $w(t) = 50\%$

Fig. 2. Values of soil moisture $w(t)$ for three evaporation regimes, where, under the condition that the moisture reaches $w_{\min} = 20\%$, an irrigation pulse i_0 is applied, causing a stepwise change in moisture to $w(t) = 50\%$.

У рамках моделювання розглянуто декілька типових значень λ , що відповідають різним умовам навколишнього середовища: помірне, середнє та інтенсивне висихання. Кожному сценарію відповідає певний період імпульсів поливу T . Моделювання виконували до встановлення періодичного режиму, коли послідовність імпульсів стає регулярною, а динаміка вологості в кожному циклі повторюється.

Для підтвердження коректності моделі проведено серію чисельних експериментів з використанням таких вихідних даних:

- максимальна вологоємність ґрунту: $W_{\max} = 100$ мм;
- критичний рівень: $w_{\min} = 20\%$;
- імпульс зрошення: $i_0 = 30\%$, тобто $I_0 = 0,3 W_{\max} = 30$ мм;
- три режими втрат вологи: режим 1 – повільне висихання; режим 2 – середнє висихання; режим 3 – інтенсивне висихання.

Симуляції виконано у середовищах MATLAB, Python (NumPy + Matplotlib) та Simulink, що дозволило перевірити інваріантність моделі і незалежність структури процесу від одиниць вимірювання.

Для кожного сценарію визначено: час досягнення критичного рівня t_k ; період сталого циклу поливу T ; мінімальні та максимальні значення вологості в циклі; форму траєкторії $W(t)$ та $w(t)$. Отримані результати чітко демонструють відповідність поведінки моделі фізичним процесам висихання ґрунту та підтверджують аналітичні характеристики системи. У всіх трьох сценаріях система переходить у періодичний режим, коли: поливи відбуваються через строго однаковий проміжок

часу, траєкторії $W(t)$ та $w(t)$ стають циклічними, аналітичний період T збігається з чисельним. Це підтверджує правильність імпульсного опису та структури моделі dissipative + impulsive system.

Графіки (рис. 2) показують: експоненційний спад вологості між подіями поливу; стрибок вологості у момент імпульсу; чітке досягнення рівня w_{\min} у точках поливу; однакову форму циклу в різних сценаріях – різняться лише швидкість. Форма кривих у % і мм повністю збігається після лінійного масштабування, що підтверджує інваріантність моделі.

Запропонована модель не суперечить концепції диференційного внесення, а навпаки, є її математичним ядром. Імпульсна дія в моделі інтерпретується як локальне зрошення, ініційоване показами датчиків вологості ґрунту, що є типовим для систем точного землеробства та крапельного зрошення. У цьому контексті моменти імпульсів t_k відповідають моментам, коли сенсори фіксують досягнення критичного рівня W_{\min} ; величина імпульсу I_0 відповідає нормі локального поливу для конкретної зони поля.

Висновки. Запропонована математична модель імпульсного зрошення може бути ефективно інтегрована в системи точного землеробства. Модель дозволяє не лише прогнозувати зміни вологості ґрунту з часом, а й визначати оптимальні моменти для зволоження з метою уникнення надмірного або недостатнього зрошення.

При інтеграції цієї моделі з геоінформаційними системами (ГІС) можливо отримати просторову картину розподілу вологості на території поля, враховуючи неоднорідність ґрунтів,

рельєф, попередню обробку та мікроклімат. Це дає аграріям змогу ухвалювати більш обґрунтовані рішення щодо зонування полів, управління водними ресурсами та оптимізації витрат на зрошення, забезпечуючи при цьому високу врожайність.

Теоретична та практична значущість дослідження полягає у розробці науково обґрунтованого підходу до управління зрошенням, що поєднує точність аналітичних методів із можливостями сучасних геоінформаційних технологій. Отримані результати можуть бути використані для створення інтелектуальних систем управління агротехнологіями нового покоління.

Наукова новизна та практична значущість полягають у запропонованій імпульсній математичній моделі динаміки вологості, що дозволяє точно формалізувати моменти необхідного поливу. Результати можуть бути використані для створення систем автоматизованого управління зрошенням у точному землеробстві, зменшуючи перевитрати води та підвищуючи урожайність.

Модель, представлена в дослідженні, може бути використана для автоматизованого керування зрошувальними системами, оцінки ефективності утримання вологи в різних типах ґрунтів, а також для оптимізації агротехнічних заходів у точному землеробстві.

Перспектива подальших досліджень передбачає більш щільну взаємодію з ГІС та інтеграцію у модель просторової картини розподілу вологості на території поля. Більш детальне моделювання має охоплювати часозалежний коефіцієнт $\lambda(t)$ або окрему функцію водоспоживання культури залежно від фази росту.

Бібліографічний список

1. Булигін С. Ю., Вітвіцький С. В. Агрофізика ґрунту: підручник. Київ: Видавництво, 2021. 315 с. URL: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/817910f2-7ded-4501-a92a-6932b9d95a51/content> (дата звернення: 20.01.2025)
2. Ромащенко М. І., Богаєнко В. О., Білоброва А. С. Двовимірне математичне моделювання водного режиму ґрунту за краплинного зрошення. *Вісник аграрної науки*. 2021. Т. 99, № 4. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202104>.
3. Токар М. В., Гаврилук В. І. Математичне моделювання фільтраційних процесів в областях з невизначеними ділянками меж за наявності водозабору. *Наука, освіта, суспільство очима молодих: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. студентів та молодих науковців*. Ч. 2. Рівне, 2013. С. 46–47. URL: <http://repository.rshu.edu.ua/id/eprint/5761/1/Токар%20М.В.%2C%20Гаврилук%20В.І.pdf> (дата звернення: 20.01.2025)
4. Abolafia-Rosenzweig R., Zhang L., Zreda M., Walker J. P., Moghaddam M. Soil moisture data assimilation to estimate irrigation water. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 22. DOI: 10.3390/rs11223754.
5. Albano R., Martinez S., Rodríguez L., Gutiérrez J. MY SIRR: minimalist agro-hydrological model for assessing water requirements and agricultural production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 144. P. 123–133. DOI: 10.1016/j.compag.2017.05.009.
6. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998.
7. Debnath S., Agyeman B. T., Sahoo S. R., Yin X., Liu J. Performance triggered adaptive model reduction for soil moisture estimation in precision irrigation. *ArXiv preprint*. 2024. arXiv:2404.01468.
8. Duque-Marín E., Rojas-Palma A., Carrasco-Benavides M. Soil water indicator for a dynamic model of crop and soil water interaction. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2023. Vol. 20, No. 8. P. 13881–13899. DOI: 10.3934/mbe.2023618.
9. Gan P., Zhang Z., He X. et al. A Django-based modeling platform for predicting soil moisture. *Water*. 2025. Vol. 17, No. 12. P. 1753. DOI: 10.3390/w17121753.
10. Hillel D. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, 1998.
11. Jury W. A., Horton R. *Soil Physics*. 6th ed. John Wiley & Sons, 2004.
12. Li Y., Simunek J., Jirka J., Wang S., Yuan J., Zhang W. Modeling of Soil Water Regime and Water Balance in a Transplanted Rice Field Experiment with Reduced Irrigation. *Water*. 2017. Vol. 9. P. 248. <https://doi.org/10.3390/w9040248>
13. Pezij M., Addiscott T. Applying transfer function-noise modelling to characterize unsaturated zone conditions. *Journal of Hydrology*. 2020. (Article). (in press).
14. Romashchenko M., Bohaienko V., Shatkovskiy A., Matyash T., Kolomiets S., Shevchuk S., Danylenko Yu., Sardak A. Концептуальні засади управління поливами при зрошенні. *Меліорація і водне господарство*. 2022. С. 5–17. DOI: 10.31073/mivg202201-328.
15. Samoilenko A. M., Perestyuk N. A. *Impulsive differential equations*. Vol. 14. Singapore: World Scientific, 1995. 462 p.
16. Serikova E., Strelnikova E. Математичне моделювання фактору евапотранспірації при зміні рівня ґрунтових вод міських територій. *Applied Questions of Mathematical Modeling*. 2019. № 2. С. 65–77. DOI: 10.32782/2618-0340/2019.2-2.6.

Стаття надійшла 24.01.2025

Розділ 2

МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 62-521:62-868:62-531.7

ДИСТАНЦІЙНЕ НАЛАШТУВАННЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ІНЕРЦІЙНОГО ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

*Петро Коруняк, к. т. н., Роман Шеремета, к. т. н.,
Сергій Березовецький, к. т. н., Олексій Швець, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна
e-mail: petrokorunyak@gmail.com; romansheremeta@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.16-21>

Коруняк П., Шеремета Р., Березовецький С., Швець О. Дистанційне налаштування робочих режимів інерційного приводу вібраційних машин для оброблення деталей

У роботі розглянуто актуальне завдання вдосконалення конструкції одновального дебалансного віброприводу для вібраційних машин, що застосовуються у сучасному машинобудуванні для інтенсифікації процесів механічного оброблення деталей. Запропоноване конструктивне рішення забезпечує можливість дистанційного та автоматизованого регулювання амплітуди коливань робочого органа завдяки зміні взаємного кута між дебалансами, розташованими на валу приводу. Використання промислового мікроконтролера дозволяє здійснювати налаштування режимів вібраційного оброблення як перед початком технологічної операції, так і безпосередньо під час робочого циклу, що значно підвищує гнучкість та ефективність процесу.

Аналіз сучасних досліджень показує, що ефективність віброоброблення визначається комплексом параметрів – амплітудою, частотою та формою коливань, а також характеристиками деталей і робочого середовища. Традиційні дебалансні приводи мають обмежені можливості регулювання, що знижує якість поверхні та скорочує ресурс обладнання. Запропонована конструкція усуває ці недоліки завдяки застосуванню електромагнітного приводу та крокового двигуна, які забезпечують точне позиціонування рухомих дебалансів і стабілізацію амплітуди коливань. Це дозволяє підтримувати оптимальні технологічні режими, уникати перевантажень та забезпечувати високу якість обробленої поверхні навіть для деталей складної конфігурації.

Впровадження розробленого рішення у конструкцію віброзбудувача відкриває можливості для створення нового покоління вібраційних машин з автоматизованим керуванням параметрами процесу. Такий підхід сприяє підвищенню енергоефективності, розширенню технологічних можливостей обладнання та забезпечує перспективи його використання у багатоцільових виробничих комплексах. Результати дослідження можуть бути застосовані як для модернізації існуючих машин, так і для розроблення нових зразків вібраційної техніки з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: налаштування, вібрація, амплітуда, дебаланс, частота, електромагніт.

Koruniak P., Sheremeta R., Berezovetskyi S., Shvets O. Remote adjustment of operating modes of the inertial drive in vibratory machines for part processing

The paper addresses the urgent task of improving the design of a single-shaft unbalanced vibration drive for vibration machines used in modern mechanical engineering to intensify processes of mechanical treatment of parts. The proposed structural solution provides the possibility of remote and automated adjustment of the oscillation amplitude of the working body by changing the relative angle between the unbalances mounted on the drive shaft. The use of an industrial microcontroller enables the tuning of vibration treatment modes both before the start of a technological operation and directly during the working cycle, which significantly increases the flexibility and efficiency of the process.

The current research shows that the effectiveness of vibration treatment is determined by a complex of parameters - amplitude, frequency, and oscillation form, as well as the characteristics of the parts and the working medium. Traditional unbalanced drives have limited adjustment capabilities, which reduces surface quality and shortens equipment service life. The proposed design eliminates these drawbacks through the use of an electromagnetic actuator and a stepper engine, which ensure precise positioning of the movable unbalances and stabilization of the oscillation amplitude. This allows maintaining optimal technological regimes, avoiding overloads, and ensuring high surface quality even for parts with complex configurations.

The implementation of the developed solution into the design of the vibration exciter opens up opportunities for creating a new generation of vibration machines with automated control of process parameters. Such an approach contributes to increased energy efficiency, expanded technological capabilities of equipment, and provides prospects for its use in multipurpose production complexes. The findings of the study can be applied both to update existing machines and to develop new samples of vibration technology with improved technical and economic indicators.

Keywords: adjustment, vibration, amplitude, unbalanced weight, frequency, electromagnet.

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні широко використовується вібраційне оброблення деталей. Використання вібраційних методів оброблення та відповідного обладнання сприяє інтенсифікації технологічних операцій, підвищує рівень механізації та автоматизації багатьох трудомістких виробничих процесів.

Вібраційне оброблення – це спосіб механічного оброблення частини або всієї поверхні деталей, розміщених у вільному або закріпленому стані в робочій камері вібраційної машини, яка заповнюється оброблювальним середовищем. У результаті проведених досліджень встановлено, що використання методів вібраційного оброблення не тільки зменшує шорсткість деталі, а й приводить до зростання продуктивності машин і забезпечує автоматизацію технологічних процесів. Особливо доцільно застосовувати віброоброблення на операціях фінішного доведення поверхонь деталей складної поверхневої конфігурації та форми.

Простота конструкції та енергоефективність розширює технологічні можливості вібраційних машин, забезпечує високу продуктивність виконуваних ними операцій. Це дозволяє зарахувати цей вид технологічного процесу до найсучасніших і перспективних методів оброблення деталей машин та приладів і сприяє вдосконаленню та розробці нових взірців обладнання з підвищеними техніко-економічними показниками [3; 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За характером коливань робочої камери (контей-

нера) у виробничих процесах використовується дво- або трикомпонентна вібрація. Двокомпонентна характерна тим, що кожна точка її здійснює гармонічні коливання в площині, перпендикулярній до осі обертання віброзбудувача, а у випадку трикомпонентної вібрації коливання мають просторовий характер [1; 3; 5].

Вібраційні машини з дебалансним віброприводом (рис. 1) для механічного оброблення деталей бувають з горизонтальною і вертикальною віссю. Вібромашини з горизонтальною віссю і з площинною вібрацією робочої камери переважно виконують U-подібної або циліндричної форми. Вібромашини з об'ємним рухом мають тороїдальні або тороїдально-гвинтові робочі камери.

Під час розроблення технологічних процесів вібраційного оброблення деталей важливе значення мають їх матеріал та робоче середовище, яке складається з наповнювача і технологічної рідини. Залежно від призначеної операції, матеріалу деталей та застосованого способу оброблення (сухий або безперервним промиванням), склад робочого середовища може бути різним.

Основними технологічними параметрами, що визначають ефективність робочого процесу (продуктивність та якість оброблюваної поверхні) під час об'ємного вібраційного оброблення в гармонійно збудованих робочих камерах, є частота та амплітуда коливань. Достатньо важливу роль у цьому відіграють також форма коливань, розміри і характеристики оброблюваних деталей, робоче середовище.

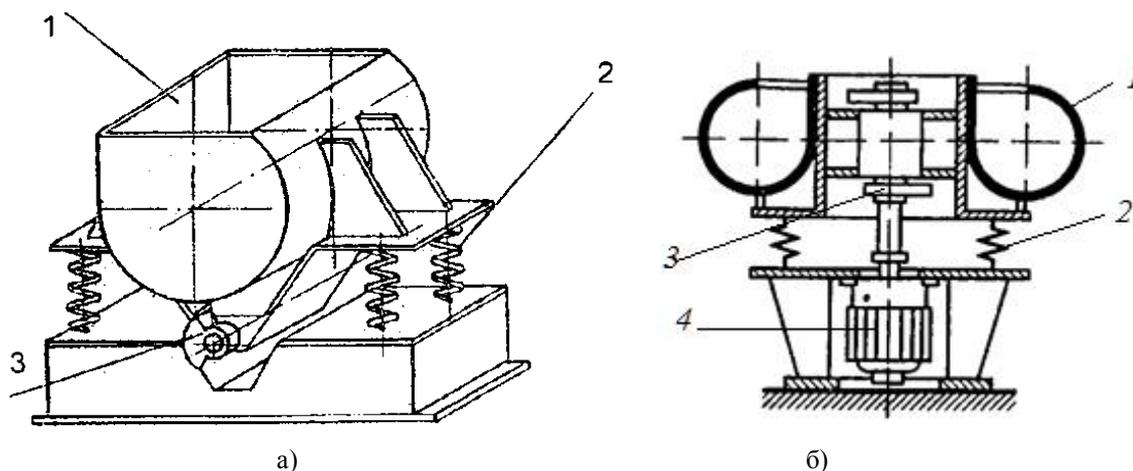


Рис. 1. Вібраційні машини з дебалансними віброзбудувачами: 1 – робоча камера; 2 – пружини; 3 – дебалансний віброзбудувач; 4 – електродвигун; а – з U-подібною робочою камерою; б – з тороїдальною робочою камерою;

Fig. 1. Vibration machines with unbalanced exciters: 1 – working chamber; 2 – springs; 3 – unbalanced exciter; 4 – electric engine a – with U-shaped working chamber; b – with toroidal working chamber

Вібраційні процеси, як правило, відбуваються з амплітудами 1...10 мм і частотами коливань 16...50 Гц [5; 6]. Важливо зауважити, що в літературі немає чітких рекомендацій щодо вибору режимів оброблення, оскільки вони залежать від багатьох чинників. Так, інтенсивність знімання матеріалу зростає лінійно зі збільшенням амплітуди коливань і нелінійно зі збільшенням частоти коливань робочої камери. Тому основним критерієм збільшення продуктивності вібраційних машин є підвищення швидкості взаємодії деталей з робочим середовищем. З іншого боку, зі зростанням амплітуди погіршується якість поверхні (можуть утворюватися забоїни), збільшуються навантаження на конструктивні елементи обладнання, що зменшує його термін служби.

Що стосується частоти коливань, то слід зазначити, що зміна її поза межами рекомендованих значень погіршує циркуляцію завантаження або вона зовсім зникає, а цей чинник є необхідною умовою виконання робочого процесу.

На підставі викладеного подальші дослідження в окресленому напрямі є актуальними і перспективними. Це спонукає до ефективного використання, вдосконалення і розроблення нових способів віброоброблення та конструкцій машин, які б забезпечили оптимальний режим роботи. Одним із напрямів реалізації поставленого завдання є плавне і дистанційне регулювання параметрів режимів вібраційного оброблення деталей. Такий підхід надасть поштовх роботі над створенням вібраційних технічних комплексів, в яких всі робочі і допоміжні операції здійснюються в автоматичному режимі [7–13].

Постановка завдання. Наше завдання – для забезпечення багатоцільового технологічного використання вібраційних машин загального призначення запропонувати конструктивне рішення оновального дебалансного віброприводу, що дає

зможу в автоматичному режимі дистанційно керувати параметрами коливання впродовж усього робочого циклу віброобробки.

Виклад основного матеріалу. Основним вузлом вібраційних машин, що забезпечує реалізацію робочого руху її камери є вібропривід. Він визначає працездатність, надійність і досконалість машини. Найбільшого розповсюдження набули вібраційні машини з інерційним (дебалансним) та електромагнітним приводом, в яких збурювальна сила генерує робочій камері коливання заданої амплітуди і частоти, які, своєю чергою, визначають параметри руху робочого середовища. Відносна простота конструкції дебалансного віброприводу супроводжується і своїми недоліками. Одним із них є складність регулювання параметрів коливання.

На рис. 2 показані схеми компонування робочої камери з вібратором. У вібромашинах з горизонтальною віссю, тобто площинною вібрацією робочої камери, корпус вібратора кріпиться знизу до неї із симетрично розташованою парою дебалансів в однаковому положенні.

У вібромашинах з кільцевою робочою камерою вібропереміщення маси завантаження відбувається за трьома координатами (об'ємний рух). Таке гвинтове переміщення інтенсифікує процес оброблення, підвищує якість, а в окремих випадках є єдиним способом оброблення тонколистових, крихких і прецизійних деталей.

Стосовно вібромашин з вертикальною віссю, слід пам'ятати, що для ефективної роботи машини необхідно розташовувати вібратор відносно робочої камери таким чином, щоб верхня пара дебалансів знаходилась у межах рівня її центра мас у завантаженому положенні. Крім того, для забезпечення гвинтоподібного переміщення маси завантаження необхідно, аби результуюча збурювальна сила однієї пари дебалансів була зміщена на певний кут ($60...110^\circ$) відносно результуючої другої пари [1; 2; 4].

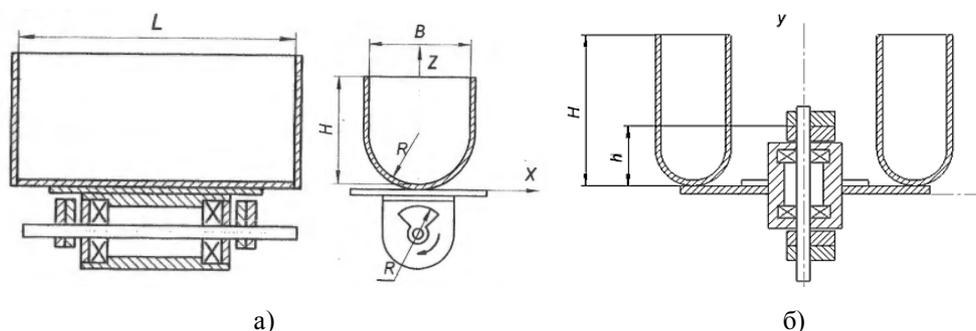


Рис. 2. Схема компонування інерційного вібратора і робочої камери: а – з U-подібною робочою камерою; б – з тороїдальною робочою камерою

Fig. 2. Layout scheme of the inertial vibrator and working chamber: а – with U-shaped working chamber; б – with toroidal working chamber

Загалом інерційний вібратор складається з двох пар дебалансів, які мають взаємне і незалежне регулювання. Зміна величини амплітуди коливання проводиться регулюванням величини збурювальної сили за допомогою суміщення або розведення дебалансів. Під час конструювання необхідно дотримуватись того, щоб у кожній парі маса і координата центра мас неврівноваженої частини дебаланса були однакові. Для уможливлення регулювання величини амплітуди коливань від 0 до максимум на кожному кінці вала вібратора розташовано по одній парі взаємно регульованих дебалансів.

Якщо способи регулювання частоти обертання вала вібратора, а отже, змінення частоти коливань, у техніці відомі (механічний – плавний і ступінчастий; електричний – використання постійного струму або частотника змінного струму), то способи дистанційного регулювання амплітуди коливань розвиваються і стоять на порядку

денному. На сьогодні відомі результати досліджень та конструкторські розробки в цьому напрямі низки вчених [7–13]. Надалі пропонується конструктивне вирішення цього питання співробітниками ЛНУП.

На рис. 3 і рис. 4 наведено конструктивну схему і тривимірну модель запропонованого одношального дебалансного віброприводу відповідно. Пристрій складається з корпусу I з підшипниковими опорами, в яких встановлений вал II в зборі. Усі складальні одиниці, що знаходяться на ньому, розташовані симетрично. На кінцях вала закріплені інерційні віброзбурювачі коливань III у вигляді двох пар дебалансів однакової конструкції. Один із дебалансів 2 віброзбурювача закріплений до його несучої основи 7 жорстко болтовим з'єднанням, а інший 3, завдяки диску-поводирю 4, фіксується до неї і має можливість у вільному стані обертатися відносно напрямних навколо осі.

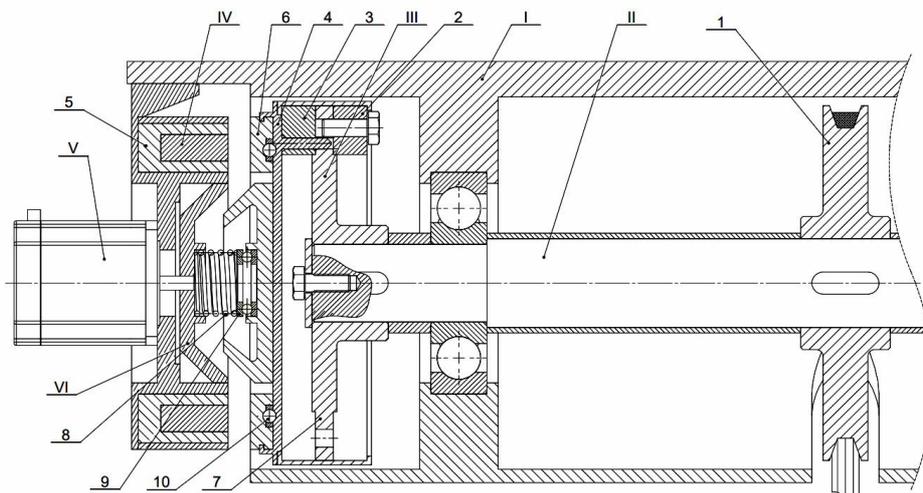


Рис. 3. Конструктивна схема запропонованого одношального дебалансного віброприводу
Fig. 3. Structural scheme of the proposed single-shaft unbalanced vibration drive

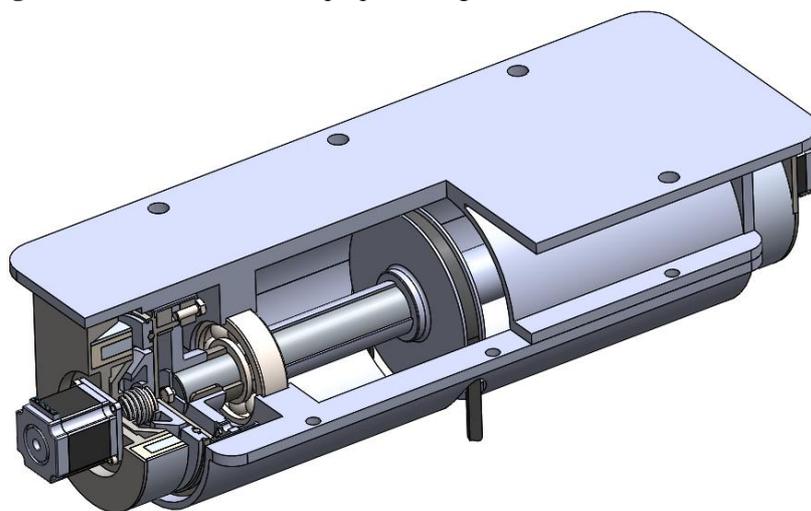


Рис. 4. Тривимірна модель запропонованого одношального дебалансного віброприводу
Fig. 4. Three-dimensional CAD model of the proposed single-shaft unbalanced vibration drive

Диск-поводир 4 призначений для реалізації двох рухів: обертального (як зазначено вище) і поступального – фіксування рухомого дебалансу 3 у необхідному положенні. Поступальний рух здійснюється завдяки електромагнітному приводу IV, а обертання приводиться в дію від крокового двигуна V, які пов'язані між собою фрикційною конічною муфтою VI. Двигун і статор електромагніту закріплені до корпусу віброприводу.

Працює пристрій таким чином. Інерційний вібраційний привід у зібраному вигляді відповідно до відомих рекомендацій закріплюється до корпусу робочої камери вібраційної машини. Пристрій урухомлюється через пасову передачу 1 привідним електродвигуном (на рисунку не показано). Слід зазначити, що привід вібромашини можна реалізувати за іншою конструктивною схемою із застосуванням вибраних засобів регулювання частоти обертання. Наприклад, таким чином: електродвигун – еластична муфта або пасова передача – контрпривід – зубчаста передача – вал віброзбудувача, або ж іншим чином.

Налаштування амплітуди коливань на заданий режим оброблення деталей здійснюється в такій послідовності. Визначивши для даних конструктивних параметрів дебалансів збудувальне зусилля, яке відповідає проєктному значенню амплітуди, здійснюють встановлення у необхідне положення рухомого дебалансу 3 відносно нерухомого 2. Для цього дистанційно в автоматичному режимі у запрограмованому алгоритмі статор електромагніту 5 притягує якір 6, який пов'язаний з диском-поводирем 4. Останній, оснащений фіксувальними елементами (штифтами), виводить рухомий дебаланс 3 із зачеплення з основою 7 віброзбудувача. Далі вмикається кроковий двигун V і через фрикційну муфту VI, яка увійшла в дію від попереднього руху, повертає рухомий дебаланс 3 на визначений програмою кут. Після цього електромагніт IV знеструмлюється і якір 6 з диском-поводирем 4 під дією пружини 8 фіксує його в даному положенні.

Для зменшення опору між тертьовими поверхнями деталей у їх відносному русі передбачено включити у конструкцію муфти упорний підшипник 9, а у кільцевий простір між диском і якором помістити кульові елементи 10.

Налаштування обох віброзбудувачів здійснюється одночасно за визначеною програмою

перед початком робочого процесу. За необхідності зміни режимів оброблення або переходу до оброблення іншого типу деталей переналаштування здійснюється в тій же послідовності.

Під час використання запропонованої конструкції інерційного приводу у вібромашинах з трикомпонентною вібрацією попередньо необхідно забезпечити відповідне взаємне положення віброзбудувачів на валу.

Здійснивши певні конструктивні зміни, його можна впровадити у конструкції вібромашин з горизонтальною циліндричною робочою камерою з одним або двома привідними електродвигунами.

Висновки. Дистанційне налаштування величини амплітуди та частоти циклічно збудувального зусилля одновального інерційного віброприводу дає змогу під час вібраційного оброблення деталей забезпечити та підтримати задані технологічні параметри робочого процесу. Перспективним напрямом подальших досліджень є створення експериментальної моделі вібраційної машини з інерційним приводом та аналіз її функціонування за умов дистанційного налаштування режимів роботи.

Бібліографічний список

1. Бернік П. С., Ярошенко Л. В. Вібраційні технологічні машини з просторовими коливаннями робочих органів / за ред. П. С. Берніка. Вінниця, 1998. 116 с.
2. Боровець В. М. Вібраційний верстат для обробки корпусу макітерки. *Вісник ДУ «Львівська політехніка»*. 1998. № 321. С. 8–12.
3. Боровець В. М., Гаврильченко О. В., Коломієць В. О. Аналіз динаміки вібраційних машин об'ємної обробки деталей. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні*. 2000. № 394. С. 104–110.
4. Боровець В. М. Дослідження впливу обробки корпусних деталей на знімання матеріалу. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*: укр. міжвідом. наук.-техн. зб. Львів, 2000. Вип. 35. С. 66–69.
5. Боровець В. М., Коруняк П. С. Дослідження сил між елементами вібраційних машин деталей в обертових пристроях. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні*. 2002. № 442. С. 12–15.
6. Карташов И. Н., Шаивский М. Е., Власов В. А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. Киев: Вища шк., 1975. 188 с.
7. Керований дебалансний вібропривід спрямованої дії з регулюванням кута напряму вібрації /

А. Тригуба, П. Луб, В. Пташник, Р. Чубик. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 53–61.

8. Коруняк П. С., Керницький І. С. *Вібраційні машини у виробничих процесах та технологіях: навч. посіб.* Львів: Сполом, 2019. 346 с.

9. Повідайло В. О. *Вібраційні процеси та обладнання*. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. 248 с.

10. Спосіб керування роботою машини із коливними рухами робочих органів: пат. 10971 А Україна: В65В G27/24. № 200502375; заявл. 16.03.2005; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12. 4 с.

11. Чубик Р. В., Горбатюк Р. М., Борзов І. Г. Пристрій для автоматизації технологічного процесу віброобробки деталей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 1(93). С. 74–80.

12. Чубик Р. В., Скварок Ю. Ю., Деньщиков О. Ю. Автоматизований вібропривод для тороїдальних вібромашин. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 17. С. 58–65.

13. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Керовані вібраційні технологічні машини: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2011. 355 с.

Стаття надійшла 10.02.2025

СТАТИЧНА ВЗАЄМОДІЯ ПАЛЬЦІВ ВИЛКИ І ЗУБКА ЧАСНИКУ

Ярослав Семен, к. т. н., Олег Крупич, к. т. н., Олег Семен, магістр

Львівський національний університет природокористування,

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

e-mail: jsemen@ukr.net, krupycholeh@gmail.com, olehsemen11@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.22-26>

Семен Я., Крупич О., Семен О. Статична взаємодія пальців вилки і зубка часнику

Запропоновано наукову працю, яка є вагомим доповненням до загальних наукових досліджень, спрямованих на створення засобів для механізованого поштучного орієнтованого садіння зубків часнику, якій передували аналітичні дослідження з визначення об'єму, маси і координат центра ваги зубків часнику, сформованих на центральному стрижні головки часнику, котрий розглядається у декартовій системі координат як частина кулі відповідного радіуса, взаємодії елементів системи «барабан – зубок часнику – вилка», взаємодії ролика штока вилки, між пальцями якої утримується зубок часнику, з різними за профілем поверхнями напрямних садильного апарату розробленої конструкції саджалки.

У статті подано результати наукових досліджень взаємодії покритих із внутрішньої сторони еластичним матеріалом пальців вилки садильного апарату машини для примусового поштучного орієнтованого садіння зубків часнику денцем вниз, а ростком вверх із зубком часнику. В ній аналітичним методом вирішено контактну задачу взаємодії двох тіл різної щільності, кожне з яких характерне відповідним модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона.

Наведено розрахункову схему з областю контакту зубка часнику і еластичного матеріалу пальців вилки у вигляді еліпса, параметри відповідних півосей якого залежать від розмірів і форм різних сортів часнику. Також враховано умову, що головні радіуси кривизни поверхні зубка часнику та еластичного елемента пальців вилки відомі, а головні площини поверхонь тіл, що контактують, збігаються.

У результаті проведених теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності, що дозволяють знайти максимальне значення сили защемлення зубка часнику між пальцями вилки за умови, що напруження, які при цьому виникатимуть, не перевищуватимуть певних допустимих значень та жорсткість пружини, необхідної для утримання зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування й безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

Ключові слова: зубок часнику, пальці вилки, взаємодія, сила защемлення, жорсткість пружини.

Semen Ya., Krupych O., Semen O. Static interaction between the tines of a fork and a garlic clove

The proposed scientific study significantly contributes to the ongoing research aimed at developing mechanized techniques for the individual planting of garlic cloves. This work is built upon analytical research focused on determining the volume, mass, and coordinates of the center of gravity of garlic cloves, which are formed on the central core of the garlic head. This is considered within a Cartesian coordinate system as part of a sphere of the corresponding radius. The study examines the interactions within the "drum - garlic clove - fork" system and explores how the roller of the fork rod interacts with the various profile surfaces of the planting device guides in the proposed planter design.

The article presents findings on the interaction between the forks of the planting device, which is designed for forced, individually oriented planting of garlic cloves with the bottom facing down and the sprout facing up. These forks are lined on the inside with an elastic material that interacts with the garlic clove. An analytical method is employed to address the contact problem arising from the interaction of two anisotropic bodies of differing densities, each characterized by its respective Young's modulus and Poisson's ratio.

A calculation scheme is provided, illustrating the contact area between a garlic clove and the elastic material of the fork tines in the shape of an ellipse. The parameters of this ellipse's semi-axes depend on the size and shape of various garlic varieties. The study also accounts for the fact that the principal radii of curvature of the garlic clove's surface and the elastic element of the fork tines are known, and that the main contact planes of the surfaces involved coincide.

The conducted theoretical analyses have resulted in analytical relationships that enable the determination of the maximum pinching force exerted on a garlic clove between the tines of the fork. This is contingent on ensuring that the resulting stresses remain below permissible limits. Additionally, the research identifies the necessary stiffness of the spring required to securely hold the garlic clove between the fork tines during in-machine transportation and direct insertion into pre-formed grooves.

Keywords: garlic clove, fork tines, interaction, pinching force, spring stiffness.

Постановка проблеми. Під час орієнтованого поштучного садіння часнику за допомогою саджалки з ланцюгово-плунжерними садильними апаратами, його зубки утримуються між нижнім коритоподібним і двома боковими пальцями,

покритими еластичним матеріалом до моменту безпосереднього встромляння їх у наперед утворену борозенку [6; 9; 15]. Зусилля, з яким пальці діють на зубок часнику, визначається жорсткістю пружного елемента механізму керування пальцями

вилки. Його значення ототожнюється з фізико-механічними властивостями зубків часнику, тобто величина вказаного зусилля не повинна перевищувати допустимих меж на руйнування самого зубка. Водночас величина зусилля, з яким пальці вилки діють на зубок часнику, має бути достатньою для його надійного утримування під час внутрішньомашинного транспортування й безпосереднього встромляння в ґрунтове середовище.

Саме тому дослідження спрямовані на визначення зусилля, яке діє на зубок часнику під час його утримування між пальцями вилки, адаптованого до фізико-механічних властивостей різних за формою і розмірами зубків часнику, актуальне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Більшість наукових праць, пов'язаних із виробництвом часнику, присвячені агротехніці його вирощування та біологічним особливостям вказаної сільськогосподарської культури [1; 2; 4; 5; 10–13; 16; 22]. Варто виокремити й наукові публікації, в яких висвітлено дослідження фізико-механічних властивостей та розмірних характеристик окремих сортів часнику, умов їх проростання і пристосованість до механізованого орієнтованого садіння [8; 14; 18].

Окремим напрямком є дослідження, спрямовані на побудову аналітичних моделей різних за формою і розмірами зубків часнику, які слугуватимуть основою для наступного математичного моделювання процесу їх поштучного захоплення робочими органами саджалок, внутрішньомашинного транспортування і орієнтованого примусового встромляння денцем униз, а ростком угору. Цим дослідженням присвячені наукові праці [17] та [21], де аналітичні моделі зубка часнику розглядали без центрального стержня і з ним та були частиною кулі певного радіуса R з центром у точці O_1 . Їхні об'єми обмежувалися двома меридіональними площинами, двогранний кут між якими становив 2α , та однією площиною, яка лежала в основі зубка і була перпендикулярною до двох інших.

Сьогодні вагома частка наукових публікацій присвячена створенню і дослідженню робочих органів машин для орієнтованого садіння зубків часнику, конструктивні та кінематичні параметри й режими роботи яких адаптовані до їхніх фізико-механічних властивостей. Так, у науковій праці [19] розглянуто модель системи «барабан – зубок часнику – вилка», де теоретично досліджено рух зубка часнику після відокремлення його від отвору на поверхні барабана до моменту захоплення пальцями вилки та отримано аналітичні залежності для визначення часу падіння та кута відривання

зубка від поверхні барабана, встановлено й проаналізовано основні закономірності вказаного процесу.

Питання взаємодії ролика штока вилки, між пальцями якої утримується зубок часнику, з різниці за профілем поверхнями напрямних садильного апарату розробленої конструкції саджалки розглядалися в наукових працях [15; 20]. У них наведено аналітичні залежності для визначення основних кінематичних параметрів взаємодії ролика, закріпленого на штоці з напрямними у вигляді дуги кола та параболи під час заглиблення вилки із зубком часнику в ґрунт, проте питання статичної взаємодії пальців вилки і зубка часнику під час вказаних досліджень не розглядали, що дещо обмежує значення отриманих результатів.

Постановка завдання. Наше завдання – отримати аналітичні залежності, які дають змогу визначити допустиме значення максимальної сили защемлення зубка часнику між пальцями вилки та жорсткість пружин, які забезпечують утримування зубка часнику між ними.

Виклад основного матеріалу. У відомій саджалці часнику [6; 9; 15] під час руху вилки разом із транспортером, її пальці, покриті з внутрішнього боку еластичним матеріалом, діють на зубок часнику з деякою силою P (рис., а), внаслідок чого у ньому виникають напруження, які, звичайно, не повинні перевищувати певного допустимого значення.

Припустимо, що у місці контакту S (рис., а, б) відомі головні радіуси кривизни поверхні зубка часнику R_1 і R'_1 та еластичного елемента пальців вилки R_2 і R'_2 , причому головні площини цих поверхонь збігаються.

Як відомо, згідно з теорією Герца, зона контакту обмежена еліпсом (див. рис., б) з центром у т. O , рівняння якого [3; 7]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

де a, b – півосі еліпса, ($a \leq b$).

Величини (розміри) півосей a та b залежать від форми й розмірів зубків часнику. З відомих аналітичних молей [17] і [21] випливає, що кожен зубок часнику має дві поверхні, переважно у вигляді плоских граней, які утворюють клин, та одну поверхню у вигляді кола певного радіуса. Саме тому під час захоплення зубка часнику пальцями вилки його зона контакту з еластичним матеріалом кожного пальця вилки буде визначатися формою поверхні зубка, яка безпосередньо з ним

взаємодіє. Щоб уникнути розбіжностей у подальших аналітичних дослідженнях, припустимо, що зони контакту зубка часнику з еластичним

матеріалом кожного з пальців вилки однакові й мають форму еліпса з відповідними півсями a та b .

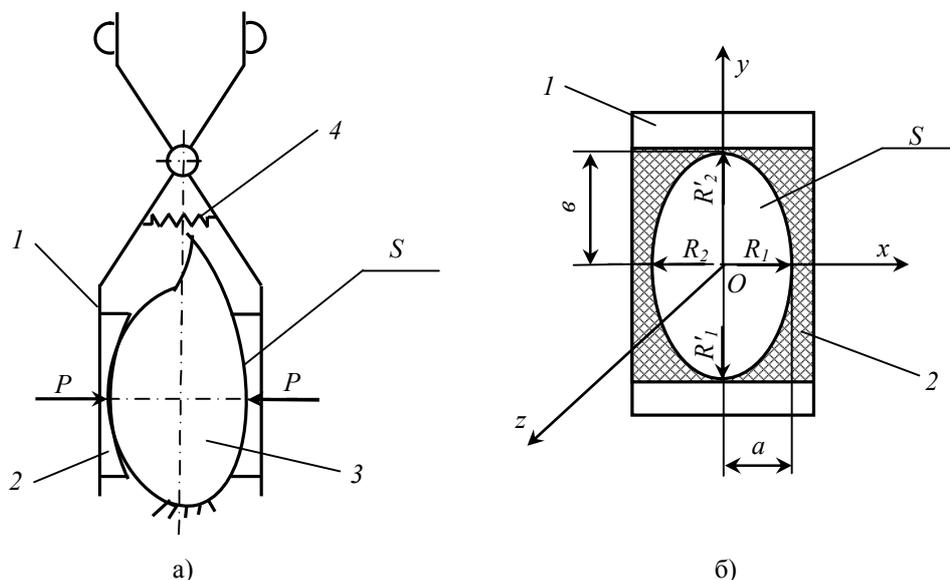


Рис. Схема взаємодії пальців вилки, покритих еластичним матеріалом із зубком часнику (а) та місце (зона) їхнього контакту (б):
 1 – пальці вилки; 2 – еластичний матеріал; 3 – зубок часнику; 4 – пружина.
Fig. Diagram of the interaction of the fork tines covered with elastic material with a garlic clove (a) and the places (zones) of their contact (b):
 1 – fork tines; 2 – elastic material; 3 – garlic clove; 4 – spring.

Напруження в зоні контакту обчислюється за формулою

$$q(x, y) = \frac{3P}{2\pi a b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}. \quad (2)$$

Щоб отримати вирази для знаходження значень півосей a і b еліпса, спочатку розв'язуємо рівняння (2) і визначаємо параметр e

$$\frac{(1 - e^2)(K(e) - E(e))}{e^2 E(e)} = \frac{B}{A + B}, \quad (3)$$

де $e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$, $A = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, $B = \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2}$,

причому $A > B$; $K(e)$ – повний еліптичний інтеграл першого роду:

$$K(e) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}; \quad (4)$$

$E(e)$ – повний еліптичний інтеграл другого роду:

$$E(e) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (5)$$

φ – змінний параметр, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Тоді півосі обчислюємо за формулами:

$$b = \sqrt[3]{\frac{3PE(e)(K_1 + K_2)}{2(1 - e^2)(A + B)}} = b_1 \sqrt[3]{p}, \quad (6)$$

$$a = b \sqrt{1 - e^2} \cdot \sqrt[3]{p} = a_1 \cdot \sqrt[3]{p}, \quad (7)$$

де $K_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}$, $K_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$, E_1 ; E_2 – модулі Юнга матеріалів, що контактують; ν_1 , ν_2 – відповідно, коефіцієнти Пуассона.

Очевидно, якщо $e = 0$, то $a = b$, і зоною контакту двох тіл є коло радіусом b .

Максимальне контактне напруження q_{max} виникає у центрі еліптичної зони і визначається за формулою

$$q_{max} = \frac{3P}{2\pi a b} = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - e^2}} \sqrt[3]{\frac{3P}{2} \left(\frac{(1 - e^2)(A + B)}{E(e)(K_1 + K_2)} \right)^2}. \quad (8)$$

Вказане напруження у цій точці поширюється в напрямках усіх координатних осей за залежностями:

$$\sigma_z = -q_{max};$$

$$\sigma_x = -2\nu_1 q_{max} - (1 - 2\nu_1) q_{max} \frac{b}{a + b}; \quad (9)$$

$$\sigma_y = -2\nu_1 q_{max} - (1 - 2\nu_1) q_{max} \frac{a}{a + b}.$$

Згідно з четвертою теорією міцності [23; 24] відомо, що:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2} \leq [\sigma], \quad (10)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження для зубка часнику.

Підставивши (9) у (10), отримаємо:

$$\frac{q_{max}(1-2\nu_1)\sqrt{a^2+\epsilon^2}-a\epsilon}{a+\epsilon} \leq [\sigma]. \quad (11)$$

Із нерівності (11), враховуючи вираз (8), визначаємо допустиме значення сили P_{max} защемлення зубка часнику між пальцями вилки:

$$P_{max} \left\langle \frac{2}{3} [\sigma] \frac{\pi a_1 \epsilon_1 (a_1 + \epsilon_1)}{(1-2\nu_1)\sqrt{a_1^2 + \epsilon_1^2} - a_1 \epsilon_1} \right\rangle^3. \quad (12)$$

Значення цієї сили впливає на жорсткість пружин, які забезпечують утримування зубка часнику між пальцями вилки, а саме:

$$c \Delta l_{max} \langle P_{max} \rangle, \quad (13)$$

де c – сумарна жорсткість пружин вилки; Δl_{max} – максимальний розтяг пружин вилки під час захоплення зубка часнику.

Із нерівності (13) випливає, що

$$c \left\langle \frac{P_{max}}{\Delta l_{max}} \right\rangle. \quad (14)$$

Отримані залежності (12) та (14) дозволяють визначити максимально допустиме значення сили P_{max} защемлення зубка часнику між пальцями вилки та відповідної їй жорсткості пружини c , необхідної для утримування зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування та безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

Згідно з попередніми аналітичними дослідженнями, для зубків часнику сорту Спас максимально допустиме значення сили P_{max} їх защемлення між пальцями вилки коливається в межах 19,79-28,44Н; для зубків часнику сорту Лідія P_{max} змінюється в межах 21,31-31,01Н; для зубків часнику сорту Любаша P_{max} становить 23,81-34,88Н.

Проте, зважаючи на мінливість розмірів і форм зубків різних сортів часнику, під час захоплення їх пальцями вилки можуть спостерігатися певні відмінності у формуванні зон (місць) контакту зубків з еластичним матеріалом, яким покриті поверхні пальців вилки садильного апарату. Саме тому виконані аналітичні дослідження мають бути доповнені експериментами, що планується зробити для озимого часнику вищенаведених сортів.

Висновки. Теоретичні дослідження статичної взаємодії пальців вилки і зубка часнику показали таке.

1. Під час взаємодії пальців вилки, покритих із внутрішньої сторони еластичним матеріалом із зубком часнику, утворюється зона контакту у

виді еліпса, розмірні параметри півосей якого залежать від форми й розмірів зубків часнику.

2. Отримані залежності (12) та (14) дозволяють визначити максимально допустиме значення сили P_{max} защемлення зубка часнику між пальцями вилки та відповідної їй жорсткості пружини c , необхідної для утримування зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування та безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

3. Допустиме значення сили P_{max} защемлення зубка часнику між пальцями вилки залежить від величини максимального контактного напруження q_{max} , яке виникає у центрі еліптичної зони.

4. Для зубків часнику сорту Спас максимально допустиме значення сили P_{max} їхнє защемлення між пальцями вилки коливається в межах 19,79-28,44Н; для зубків часнику сорту Лідія P_{max} змінюється в межах 21,31-31,01Н; для зубків часнику сорту Любаша P_{max} становить 23,81-34,88Н.

Бібліографічний список

1. Барабаш О. Ю. Технологія вирощування овочів і плодів. Київ: Вища школа, 2004. 240 с.
2. Бобось І. М. Господарсько-біологічна оцінка сортів часнику озимого (*Allium sativum* L.), вирощених у Лісостепу України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Агрономія»*. 2011. Вип. 162. Ч. 1. С. 230–235.
3. Божедарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Львів: Світ. 1994. 560 с.
4. Борисюк В., Багай Т., Волинець О., Дика Л. Ефективність селекції часнику озимого за участі екологічних форм Західного регіону України. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агрономія*. 2021. № 25. С. 120–124.
5. Борисюк В. С., Багай Т. І. Особливості технології вирощування часнику озимого. *Плантатор*. 2018. № 1. С. 32–34.
6. Вилка ланцюгово-плунжерного садильного апарату: пат. 137149 Україна: МПК А01С 7/16. № u 2019 02423; заявл. 12.03.19; опубл. 10.10.19. Бюл. № 19. 4 с.
7. Ніщенко І. О., Шевчук В. В. Теоретичні дослідження руйнування насінин олійних культур. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 11, т. 2 (66). С. 234–239.
8. Кузенко Д. В., Семен О. Я., Гошко З. О., Семен Я. В. Дослідження розмірно-масових показників зубків часнику. *Збірник наукових статей Луцького національного технічного університету: сільськогосподарські машини*. 2018. Вип 39. С. 86–93.
9. Кузенко Д. В., Семен О. Я. Машина для садіння зубків часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 114–118.

10. Лихацький В. І. Біологія і агротехніка вирощування часнику. Київ: УСГА, 1992. 27 с.
11. Лихацький В. І. Чеснок. Біологія і технологія вирощування: практич. посібник. Київ: УСХА, 1990. 96 с.
12. Лихацький В. І., Попова Л. М. Вплив площі живлення на продуктивність нестрілкуючого часнику. *Аграрний вісник Причорномор'я: зб. наук. пр. Одеського державного сільськогосподарського інституту*. 1998. Вип. 2. С. 59–63.
13. Мельник О. В., Митенко І. М. Вирощування часнику озимого: рекомендації. Київ: Аграрна наука, 2020. 52 с.
14. Oleg Krupich, Yaroslav Semen, Rostyslav Kudrynetskyi, Oksana Berezovetska, Viktor Dnes and Stepan Krupych. Experimental studies of the influence of oriented planting cloves for the formation of garlic heads. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. June 2024. Vol. 19, No 11. S. 653–657. <https://doi.org/10.59018/062486>.
15. Oleg Semen, Dmytro Kuzenko, Yaroslav Semen. A machine for oriented planting of garlic teeth. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, Rzeszów, 2017. Vol. 17, No 2. S. 55–60.
16. Попова Л. М. Часник в Україні: навч. посіб. Одеса: ВМВ, 2011. 160 с.
17. Семен О. Я., Кузенко Д. В., Семен Я. В. Аналітична модель зубка часнику. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 40–46.
18. Семен О. Я. Визначення коефіцієнта та кута зовнішнього тертя зубків часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 162–167.
19. Семен О., Кузенко Д., Семен Я. Теоретичні дослідження параметрів системи «барабан – зубок часнику – вилка» саджалки часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 77–85.
20. Семен Я. В. Дослідження параметрів системи «вилка – напрямна» саджалки часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 39–44.
21. Семен Я. В., Крупич О. М., Пономаренко О. М., Левко С. І. Аналітична модель зубка часнику з центральним стрижнем. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2021. № 25. С. 36–41.
22. Снітинський В. В., Лішак Л. П., Ковальчук Н. І., Лішак І. О. Часник на фермерському полі та присадибній ділянці. Львів: Український бестселер, 2010. 110 с.
23. Хайлис Г. А. Механика растительных материалов. Киев: УААН, 1994. 236 с.
24. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: навч. посіб. Київ: Знання, 2009. 380 с.

Стаття надійшла 15.02.2025

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АГРОДРОНІВ НА ТРИВАЛІСТЬ ЇХНЬОГО ПОЛЬОТУ

*Анатолій Тригуба, д. т. н., Андрій Шарибура, к. т. н., Зіновій Гошко, к. т. н.,
Олександр Левчук, к. т. н., Руслан Барабаш, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ascharibura@gmail.com; zinovijg9@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.27-33>

Тригуба А., Шарибура А., Гошко З., Левчук О., Барабаш Р. Вплив конструктивних параметрів агродронів на тривалість їхнього польоту

Наведено результати експериментальних досліджень впливу конструктивних та енергетичних параметрів агродрона малого класу на тривалість його польоту. Об'єктом дослідження є агродрон 7" класу, оснащений літій-іонними акумуляторними батареями різної ємності, призначений для виконання завдань моніторингу посівів і локального внесення агротехнологічних препаратів. Встановлено закономірності впливу ємності акумуляторної батареї та маси корисного навантаження на час перебування агродрона у повітрі в умовах стабілізованого польоту.

Експериментальні дослідження проведено за одно- та двофакторним планом із повторенням вимірювань. Ємність акумуляторних батарей змінювалася в діапазоні 4000-10000 мА·год, а маса корисного навантаження – від 0 до 1,5 кг. Для кожного режиму виконувалося три польоти з подальшою статистичною обробкою результатів. Політ вважався завершеним за досягнення граничної напруги 2,66 В на елемент акумулятора. Дослідження проводилися за температури навколишнього середовища 18-22 °С та швидкості вітру до 2 м/с.

Встановлено, що збільшення ємності акумуляторної батареї з 4000 до 8000 мА·год забезпечує зростання тривалості польоту в середньому на 29 % за відсутності корисного навантаження, тоді як подальше збільшення ємності до 10000 мА·год має обмежену ефективність через зростання маси батареї. Показано, що збільшення маси корисного навантаження від 0 до 1 кг призводить до зменшення часу польоту на 42-50 % незалежно від ємності акумулятора. Визначено, що для агродрона 7" класу оптимальною з кута зору співвідношення маси та тривалості польоту є акумуляторна батарея ємністю 8400 мА·год, яка забезпечує час перебування у повітрі в межах 13-29 хв залежно від навантаження.

Отримані результати можуть бути використані у виборі енергетичних параметрів агродронів малого класу для задач точного землеробства.

Ключові слова: агродрон, акумуляторна батарея, ємність батареї, корисне навантаження, тривалість польоту, точне землеробство.

Tryhuba A., Sharybura A., Hoshko Z., Levchuk O. Barabash R. Influence of structural parameters of agricultural drones on their flight duration

The paper presents the results of experimental studies on the influence of structural and energy parameters of a small-class agricultural drone on its flight duration. The object of the study is a 7-inch class agricultural drone equipped with lithium-ion battery packs of various capacities, intended for crop monitoring and localized application of agricultural treatments. The study aims to determine the regularities of the influence of battery capacity and payload mass on the airborne time of the agricultural drone under stabilized flight conditions.

The experimental investigations were carried out according to single-factor and two-factor experimental designs with repeated measurements. Battery capacity ranged from 4000 to 10000 mAh, while payload mass ranged from 0 to 1.5 kg. For each operating mode, three flight tests were performed, followed by statistical processing of the obtained data. A flight was considered completed when the battery cell voltage reached the cutoff value of 2.66 V. The experiments were conducted at an ambient temperature of 18-22 °C and wind speeds not exceeding 2 m/s.

The results showed that increasing the battery capacity from 4000 to 8000 mAh led to an average increase in flight duration of approximately 29% under no-payload conditions, whereas a further increase to 10000 mAh provided limited improvement due to the increased battery mass. It was found that increasing the payload mass from 0 to 1 kg reduced the flight time by 42-50%, regardless of battery capacity. The study determined that, for a 7-inch class agricultural drone, a battery capacity of 8400 mAh is optimal in terms of the balance between mass and flight duration, providing an airborne time of 13-29 minutes depending on the payload.

The obtained results can be used to select the energy parameters of small-class agricultural drones for precision agriculture applications.

Keywords: agricultural drone, battery capacity, payload, flight duration, lithium-ion battery, precision agriculture.

Постановка проблеми. Розвиток точного землеробства та біотехнологій вимагає ефективних мобільних платформ для моніторингу та обробки посівів. Агродрони – легкі та маневрені безпілотні літальні апарати – дедалі ширше застосовуються в аграрному секторі для моніторингу посівів і виконання технологічних операцій.

Якщо перші агродрони використовували переважно для моніторингу посівних площ, то сьогодні спектр їхнього застосування значно розширюється. Одним із чинників зростання застосування агродронів в Україні є воєнні дії, які обмежують використання традиційної сільськогосподарської техніки, особливо на прифронтових територіях. Війна наклала багато обмежень на аграрний сектор (брак робочих рук, обмеженість у застосуванні техніки у прифронтових територіях та ін.). Фахівці відзначають велику зацікавленість фермерів до технології ультрамалого обприскування (УМО) із середньою нормою витрати робочої суміші 5–10 л/га. Технологія ультрамалого обприскування забезпечує дрібнодисперсне внесення робочої рідини, що підвищує коефіцієнт покриття поверхні рослин і ефективність захисту від хвороб та шкідників. Ще один напрямок використання агродронів – захист ділянок поля із локальним розмноженням гризунів (миші, ховрахи).

Розширення функціональних можливостей агродронів і зростання номенклатури виконуваних ними завдань зумовлює підвищені вимоги до їхніх енергетичних характеристик, зокрема до тривалості польоту за різних умов експлуатації та рівнів корисного навантаження. У цьому контексті ключовим чинником є вибір акумуляторної батареї, маса та ємність якої безпосередньо впливають на ефективність виконання агротехнологічних операцій.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу ємності акумуляторної батареї та маси корисного навантаження на тривалість польоту агродрона 7" класу в умовах аграрного застосування.

У статті показано метод оцінки впливу зміни корисного навантаження на споживання енергії агродрона 7" класу з метою його застосування в системах моніторингу посівних площ на основі експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Агродрони – це складні системи, які сміливо можна назвати новим етапом еволюції землеробства. Завдяки стрімкому розвитку безпілотних технологій ці літальні апарати стають незамінними помічниками сучасних аграріїв, пропонуючи безліч

переваг порівняно з традиційними методами обробки полів. Агродрони для сільського господарства відкривають можливості до більш точного, ефективного, екологічного та економічно вигідного господарювання. У статті «Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БпЛА» [4] оцінено вплив зміни температури навколишнього середовища на процес розряду акумуляторної батареї безпілотного літального апарата (БпЛА). Досліджено особливості роботи акумуляторів у різних температурних умовах і визначено їхні можливі впливи на тривалість польоту та продуктивність БпЛА. Результати дослідження можуть бути корисні для оптимізації роботи акумуляторних систем в умовах змінних температур, що сприятиме покращенню ефективності та надійності безпілотних літальних апаратів у різних кліматичних умовах. У статті «Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві» [6] проаналізовано застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві для захисту рослин від хвороб та шкідників на основі вивчення зарубіжного досвіду використання мобільних авіаційних комплексів, маркетингових досліджень іноземних компаній та вивчення переваг і недоліків БпЛА порівняно з пілотними літальними апаратами. Виявлено, що Україна має потенціал до використання БпЛА у сільському господарстві з огляду на технічні, економічні та людські ресурси. Досліджено основні виробники БпЛА, зокрема для потреб сільського господарства іноземних та українських; визначено основні технічні характеристики БпЛА, що можуть бути використані для потреб сільського господарства в наукоємні технології, представлено SWOT-аналіз розвитку безпілотної сільськогосподарської авіації.

У праці [6] досліджено проблему адаптивності літій-іонних батарей, що живлять БпЛА до екстремальних температурних умов. Результати досліджень свідчать, що високі температурні умови можуть значно знизити термін служби батарей. У праці [8] вивчено вплив струму та навколишньої температури на термічну відповідь літій-іонних батарей. Співвідношення між цими факторами та температурними варіаціями всередині батареї розглянуто в контексті їхнього впливу на поведінку розряду та заряду. Стаття [4] пропонує оптимізаційний підхід для врахування впливу зміни температури повітря на ємність акумуляторної батареї БпЛА. Досліджено методи планування польотів БпЛА з урахуванням невизначеності тривалості роботи батареї та температурних умов. У праці [1] акцентується на точному прогнозуванні

рівня заряду (SOC) літій-іонних батарей для БпЛА, використовуючи метод опорних векторів. Стаття “All-temperature area battery application mechanism, performance, and strategies” [4] є комплексним оглядом, який досліджує теплові характеристики та управління літій-іонними батареями в усіх температурних зонах, включаючи їхню продуктивність та стратегії використання. Як бачимо, дослідження впливу зміни температури на розряд батарей БпЛА є актуальним та важливим напрямком у наукових дослідженнях. Підходи, представлені у дослідженнях, дають змогу краще розуміти механізми впливу температурних змін на роботу батарей та розробляти оптимальні стратегії для підвищення ефективності та тривалості польотів БпЛА. Перелічені статті можуть бути корисними для подальших досліджень та розробки нових технологій у галузі безпілотної авіації.

Постановка завдання. Попит на використання агродронів у сільському господарстві невпинно зростає. Відкриваються курси з підготовки відповідних фахівців управління агродронами. Рівень підготовки операторів агродронів безпосередньо впливає на ефективність застосування цих технологій у сільському господарстві. Тому є потреба в поглибленому вивченні та дослідженні малих літальних апаратів. Збільшення часу перебування дронів у повітрі – важлива проблема, тож дослідження факторів, що впливають на цей процес, дуже цінні. Агродрони забезпечують автоматизацію технологічних процесів і високу точність виконання операцій, що підвищує їх економічну та технологічну доцільність. Вони здійснюють моніторинг і обробку з найменшою похибкою, що робить процес більш ефективним і економічним. Технології, що використовуються в агродронах, охоплюють системи навігації, які дозволяють дрону точно стежити за маршрутами і виконувати завдання з максимальною ефективністю.

Особливу увагу слід звернути на такі показники:

- корисне навантаження – визначає об’єм ємності або масу контейнера для сипучих речовин. Більш корисне навантаження сприяє збільшенню площі обробки посівів за один виліт;
- продуктивність – це гектари за годину або кілограми на годину – вища продуктивність скорочує терміни обробки;
- ширина захвату – впливає на продуктивність агродрона за один політ;
- час польоту – визначає тривалість первинної роботи агродрона на одному заряді акумулятора;

- швидкість польоту та опір вітру – ці дані важливі для польоту в різних погодних умовах;

- наявність в агродроні функцій обприскування, розкидання, навігації та керування, а також системи безпеки у вигляді датчиків перешкод, систем запобігання зіткнень та резервних систем живлення.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводили за одно- та двофакторним планом із повторенням вимірювань. Ємність акумуляторної батареї та маса корисного навантаження змінювалися дискретно. Кожен експериментальний режим повторювався тричі, що дало змогу оцінити середні значення та варіацію результатів. Тривалість польоту вимірювали до досягнення граничної напруги 2,66 В на елемент акумулятора. Температура навколишнього середовища під час експериментів становила 18-22 °С, швидкість вітру не перевищувала 2 м/с, висота польоту – 10-15 м. Перед початком досліджень проводили калібрування датчиків та перевіряли енергетичну систему дрона.

Дослідження проводили для визначення закономірностей впливу конструктивних параметрів агродронів на тривалість польоту за зміни основних характеристик енергосистеми та навантаження. Для цього використали агродрон 7-дюймового класу масою 0,57 кг, обладнаний польотним контролером SpeedyBee F405 V4, двигунами типу 2807 1300KV, трипелюстковими пропелерами 7×3,5×3 та живленням від акумуляторної батареї типу 6S Li-Ion. Експерименти проводили у стабілізованому режимі польоту (Angle, Horizon), який забезпечує сталу тягу й дозволяє об’єктивно оцінити енергоспоживання під час горизонтального руху або режиму зависання.

Під час виконання експерименту змінювали два основні параметри – ємність акумулятора та корисне навантаження. Ємність батарей відповідно прийнята 4000, 8000, 8400 та 10000 мА·год, а маса навантаження змінювалась у межах від 0 до 1,5 кг. Для кожного варіанта параметрів виконували три польоти, після чого розраховували середнє значення тривалості польоту. Політ вважався завершеним у момент зниження напруги до 2,66 В на елемент.

Залежність тривалості польоту T від енергетичних характеристик системи описується співвідношенням:

$$T = \frac{60 \cdot E_u}{P_h}, \quad (1)$$

де E_u – використана енергія акумулятора; P_h – потужність, потрібна для утримання апарата в повітрі.

Потужність у режимі зависання визначається за узагальненою формулою, що базується на теорії імпульсу для гвинтових апаратів:

$$P_h = k \frac{(mg)^{3/2}}{\sqrt{2\rho A_\Sigma}}, \quad (2)$$

де m – маса дрона з навантаженням; g – прискорення вільного падіння; ρ – густина повітря; A_Σ – сумарна площа дисків пропелерів; k – емпіричний коефіцієнт, що враховує втрати у системі приводу.

Повну енергію акумулятора розраховували за формулою:

$$E = \frac{C}{1000} U, \quad (3)$$

де C – ємність, мА·год; U – робоча напруга батареї, В

З урахуванням внутрішніх втрат реальна використана енергія становить:

$$E_u = \eta_u \cdot E, \quad (4)$$

де η_u – коефіцієнт корисного використання енергії, що залежить від типу акумулятора та режиму розряду.

Для статистичної обробки результатів розраховували середнє значення тривалості польоту, стандартне відхилення та довірчий інтервал. Середню тривалість визначали за формулою:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (5)$$

а стандартне відхилення –

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}, \quad (6)$$

де n – кількість повторів вимірювання.

Узагальнені результати експерименту подано у табл., де наведено середні значення тривалості польоту за різних ємностей батарей та навантажень.

Статистична обробка результатів показала, що стандартне відхилення тривалості польоту в усіх експериментальних режимах не перевищувало 6–9 % від середнього значення, що свідчить про задовільну відтворюваність результатів. Довірчі інтервали для середніх значень тривалості польоту за рівнів значущості 0,95 не перекривалися для режимів із різною масою навантаження, що підтверджує статистично значущий вплив корисного навантаження на час польоту.

Провівши статистичну обробку даних, будемо графічні залежності (рис. 1-4).

Таблиця. Середня тривалість польоту агродрона 7" класу для різних значень ємності батареї та маси корисного навантаження

Table. Average flight duration of a 7-inch class agricultural drone for different battery capacities and payload masses

Навантаження, кг	Ємність, мА·год	Час польоту, хв																	
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
0,0	10000	25,00	23,20	23,10	23,10	22,90	22,50	22,10	21,90	21,50	21,30	20,80	20,40	20,00	19,70	19,00	18,10	17,40	15,40
	8400	25,00	23,60	23,40	23,10	22,40	22,40	22,10	21,80	21,40	21,00	20,60	20,40	19,90	19,20	18,00	15,20		
	8000	25,00	23,50	23,30	23,10	22,50	22,20	21,80	21,10	20,80	20,70	20,20	19,80	19,40	18,40	16,30	14,50		
	4000	25,00	23,10	22,70	22,10	21,50	20,70	20,30	19,40	19,20	18,30	13,10							
0,5	10000	25,00	23,10	22,50	22,30	21,20	20,90	20,50	19,80	19,40	17,80	15,70							
	8400	25,00	23,10	22,20	22,10	21,40	20,80	19,80	19,50	18,00	13,90								
	8000	25,00	22,60	21,80	21,70	21,00	20,50	20,30	19,70	18,70	16,30								
	4000	25,00	22,20	21,70	19,90	19,50	18,90	16,50											
1,0	10000	25,00	22,40	22,10	21,50	20,90	20,40	19,50	19,00	18,50	17,50	15,60							
	8400	25,00	22,80	22,40	21,60	20,90	20,10	19,50	18,00	12,40									
	8000	25,00	22,40	21,90	21,10	20,40	19,80	18,70	16,70	14,20									
	4000	25,00	21,40	20,10	19,00	17,50	13,00												
1,5	10000	25,00	22,00	21,50	21,10	20,40	19,50	18,40	16,10										
	8400	25,00	22,20	21,80	20,90	20,20	19,40	17,60											
	8000	25,00	21,90	21,30	20,40	19,50	18,40	16,00											
	4000	25,00	20,60	19,40	18,10														

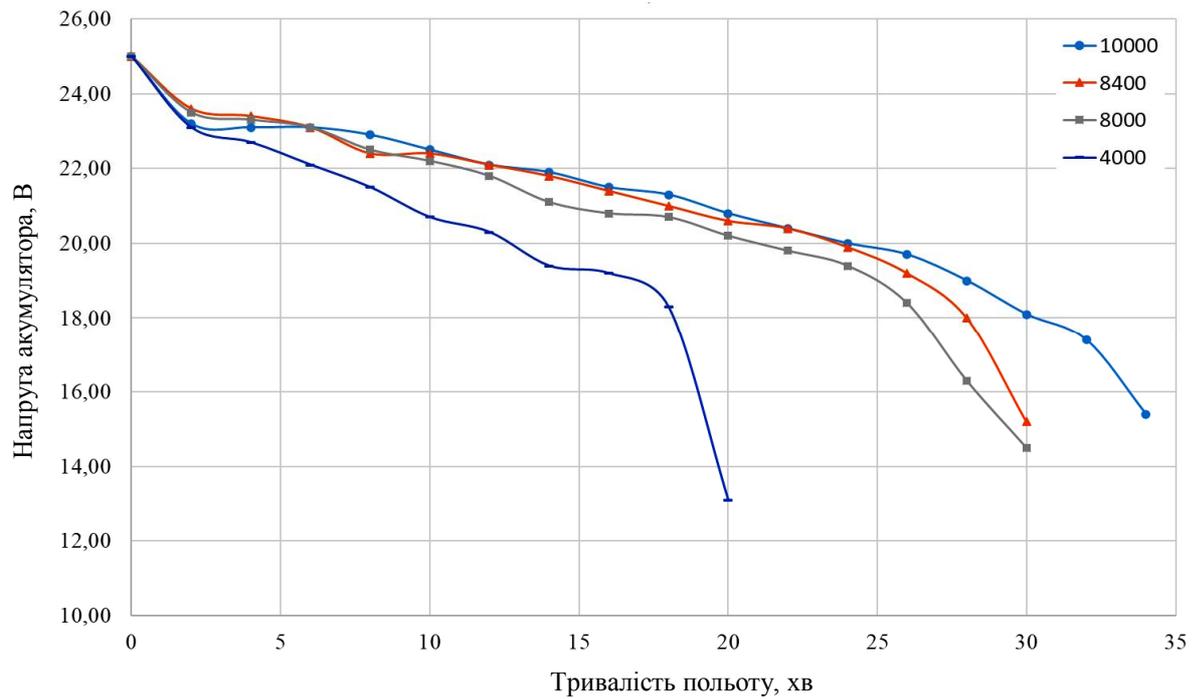


Рис. 1. Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 0 кг
Fig. 1. Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 0 kg

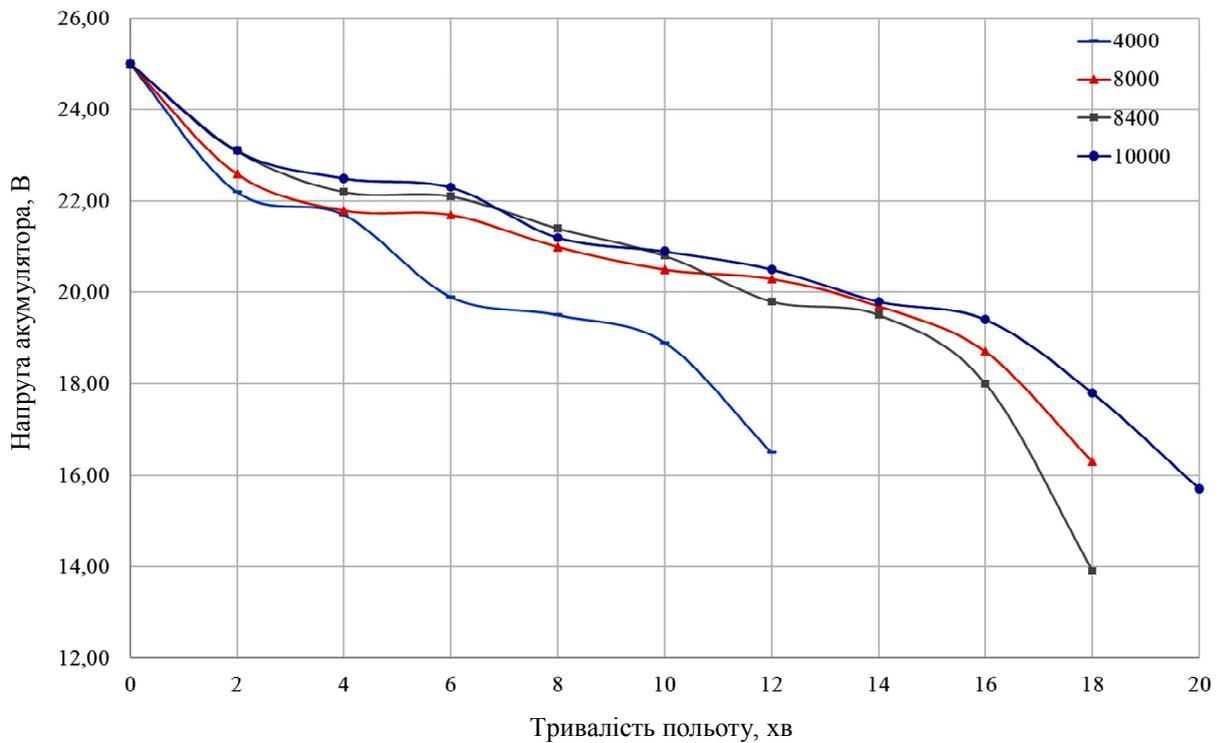


Рис. 2. Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 0,5 кг
Fig. 2. Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 0.5 kg

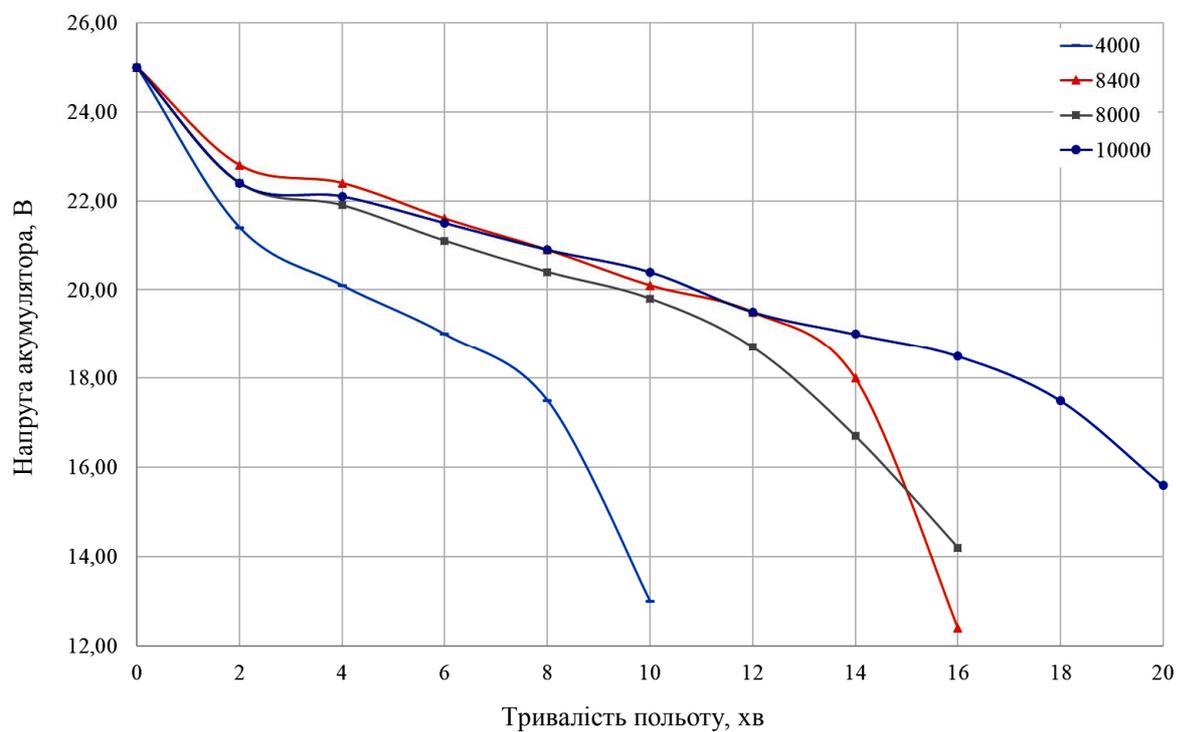


Рис. 3. Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 1,0 кг
Fig. 3. Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 1.0 kg

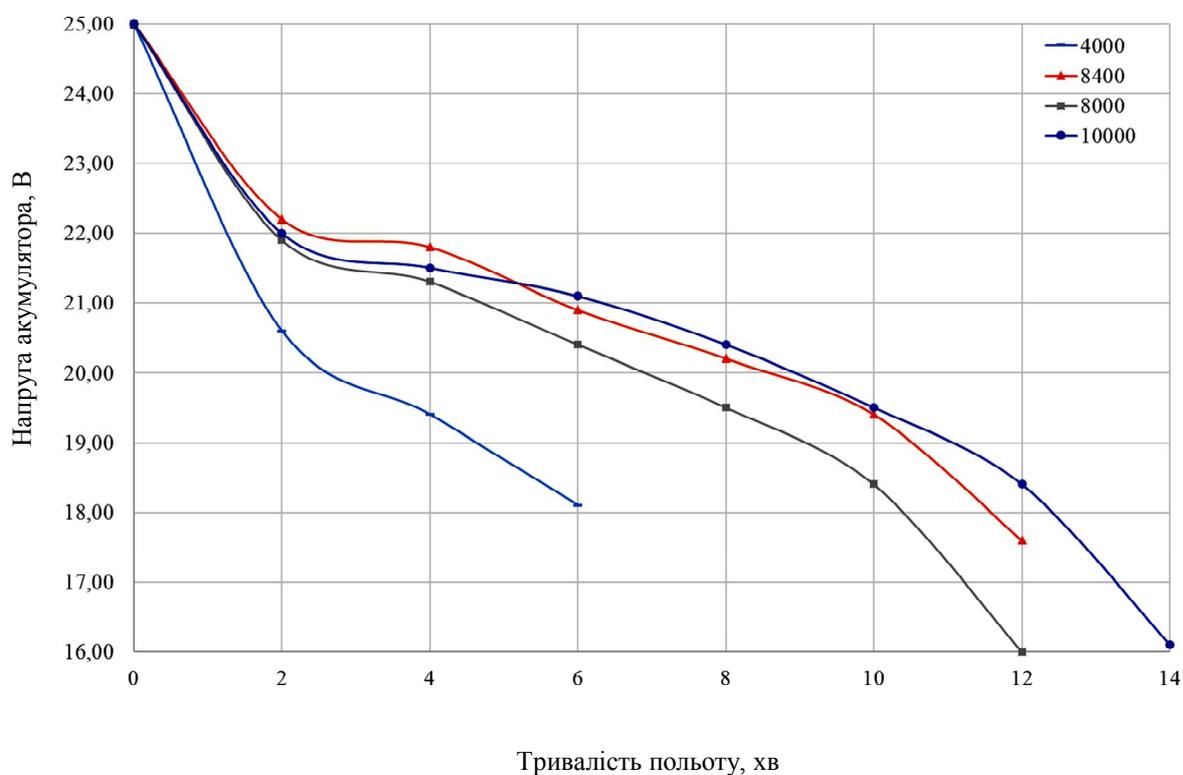


Рис. 4. Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 1,5 кг
Fig. 4. Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 1.5 kg

Отримані експериментальні результати узгоджуються з даними літературних джерел [7], у яких показано нелінійний характер зростання енергоспоживання мультикоптерів зі збільшенням їхньої маси. Подібні тенденції також відзначено в дослідженнях, присвячених оптимізації енергетичних параметрів БПЛА для аграрних завдань. Водночас, на відміну від наведених праць, у нашому дослідженні акцент зроблено на практичному застосуванні агродрона конкретного класу (7"), що дозволяє отримати прикладні рекомендації для вибору акумуляторів залежно від маси навантаження. У подальшому планується проведення аналогічних досліджень для інших типів (10-ти та 11-тиждіймових) агродронів.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їхнього використання при проектуванні та експлуатації агродронів малого класу для завдань моніторингу посівів, локального внесення біологічних препаратів і захисту рослин. Запропоновані результати можна використати у виборі енергетичних параметрів дрона з урахуванням запланованого корисного навантаження.

Висновки. Збільшення ємності акумуляторної батареї підвищує тривалість польоту агродрона, однак ефективність цього зростання має обмежений характер через збільшення маси батареї. Наприклад, за маси навантаження 0 кг використання батареї 8000 мА·год забезпечує на 29 % більший час перебування в повітрі порівняно з 4000 мА·год (див. рис.1). Отже, ефективність зростання ємності має обмежений характер, оскільки додаткова маса батареї частково нівелює вигоди у часі.

Збільшення маси корисного навантаження суттєво зменшує тривалість польоту. Так, при збільшенні навантаження від 0 кг до 1 кг час роботи агродрона скорочується в середньому на 42-50 %, навіть за використання батареї максимальної ємності.

Для агродрона 7" класу оптимальною з кута зору тривалості польоту виявилася батарея ємністю 8400 мА·год. При різних навантаженнях (порівняно з батареєю 10000 мА·год) різниця в тривалості польоту становила 7-16 %. Це забезпечує баланс між тривалістю польоту (13-29 хв) та допустимою масою, що дозволяє виконувати моніторинг посівів і локальне внесення препаратів. Використання батареї більшої ємності (10000 мА·год) доцільне лише при легших навантаженнях (до 0,5 кг), оскільки додаткова маса знижує ефективність.

Подальші експерименти варто спрямувати на: дослідження роботи дронів інших класів (10" та 11"); врахування впливу температурних умов на розряд батареї; перевірку дронів у динамічних польотних режимах (рух за маршрутом, зміна висоти, вітер); аналіз впливу типу акумуляторів (Li-Ion, Li-Po, LiFePO₄).

Практичні рекомендації: для моніторингу посівів без додаткового обладнання оптимально використовувати батарею 10000 мА·год (польоти понад 30 хв); для внесення біопрепаратів із навантаженням до 1 кг доцільно застосовувати батарею 8400 мА·год, що забезпечує прийнятний баланс між масою та часом польоту (14-18 хв); навантаження понад 1 кг для агродронів 7" класу малоефективне, оскільки різко зменшує час перебування у повітрі.

Бібліографічний список

1. Васильєв І.О. Акумуляторні системи для безпілотних літальних апаратів. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2. С. 45-51.
2. Васильєв І.О. Енергетичні системи БПЛА. *Технічна електроніка*. 2020. № 2. С. 45–51.
3. Дрони у сільському господарстві, або Як починалося точне землеробство. *Agravery*. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/droni-u-silkskomu-gospodarstviabo-ak-pocinalosa-tocne-zemlerobstvo> 14.02.2025 (дата звернення 10.01.2025)
4. Лось А.М., Велігорський О.А., Роженков А.М., Хоменко Є.В. Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БПЛА. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*. 2023. Вип. 3(17). С. 31-36.
5. Офіційна документація Molicel та Samsung INR18650. URL: <https://www.molicel.com/inr-21700-p45b/> (дата звернення 10.01.2025)
6. Смірнов Я. Про дрони сільськогосподарського призначення. 50 North GIS Blog from Ukraine. URL: <http://www.50northspatial.org/ua/agricultural-drones/> (дата звернення 30.01.2025).
7. Юн Г. М., Мединський Д.В. Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 335-341.
8. Beigi P., Rajabi M.S., Aghakhani S. An Overview of Drone Energy Consumption Factors and Models. arXiv:2206.10775, 2022. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2206.10775> (дата звернення 10.01.2025)
9. Kalantari A., Gharibi M. Flight endurance optimization for multirotor UAVs. *Journal of UAV Systems*. 2022. № 10(2). С. 120-132.

Стаття надійшла 03.02.2025

Розділ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 631.363:631.354

ТЕХНОЛОГІЯ МИТТЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА РІЗНИХ РІВНІВ ЗАБРУДНЕННЯ

Анатолій Тригуба, д. т. н., Орест Фількін, аспірант

Львівський національний університет природокористування,

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

e-mail: trianamik@gmail.com; filkin.orest@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.34-47>

Тригуба А., Фількін О. Технологія миття сільськогосподарської техніки та метод оцінювання його ефективності за різних рівнів забруднення

Виконано аналіз існуючих технологій та підходів до миття сільськогосподарської техніки. Встановлено, що, попри їхню поширеність, вони зосереджуються переважно на окремих показниках ефективності і не враховують комплексного впливу часу, енергетичних витрат та якості змивних вод. Обґрунтована доцільність удосконалення технології миття сільськогосподарської техніки та розроблення методу, який дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність процесу за різних рівнів забруднення. Удосконалена технологія миття сільськогосподарської техніки ґрунтується на поєднанні традиційних операцій із сучасними інтелектуальними підходами до контролю якості. Алгоритм цієї технології охоплює 18 кроків, що забезпечують використання машинного зору для початкової оцінки рівня забруднення та адаптацію послідовності операцій до фактичного стану поверхонь. Передбачено виконання додаткового миття для видалення стійких нашарувань та повторний контроль після основного очищення, що формує замкнений цикл процесу з урахуванням сенсорних даних, зменшення витрат ресурсів і підвищення екологічної безпеки. Розроблений метод оцінювання ефективності миття складається з 6 блоків і забезпечує комплексний підхід до аналізу результативності, поєднуючи критерії очищення поверхонь, якість змивних вод, тривалість операцій та витрати ресурсів в інтегральний індекс. Це дозволяє об'єктивно порівнювати режими миття, враховуючи технологічні й економічні аспекти, та формує підґрунтя для впровадження систем автоматизованого контролю. У результаті проведених досліджень виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R у складі з причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за трьох рівнів забруднення. Встановлено, що при низькому рівні інтегральний показник ефективності досяг найвищих значень завдяки оптимальному співвідношенню якості очищення та ресурсних витрат. Водночас за високого рівня забруднення ключовими чинниками зниження ефективності є надмірні витрати води та енергії, а також збільшена тривалість циклу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних кіберфізичних систем миття, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи з урахуванням фактичного рівня забруднення, витрат ресурсів та екологічних вимог.

Ключові слова: миття, сільськогосподарська техніка, ефективність, алгоритм, метод, забруднення, кіберфізична система.

Tryhuba A., Filkin O. Technology for washing agricultural machinery and a method for evaluating its effectiveness at different levels of contamination

An analysis of existing technologies and approaches to washing agricultural machinery has been carried out. It has been established that, despite their prevalence, they focus mainly on individual performance indicators and do not take into account the complex impact of time, energy consumption, and the quality of wash water. The feasibility of improving the technology for washing agricultural machinery and developing a method that allows for an objective assessment of the process effectiveness at different levels of contamination has been substantiated. The improved technology for washing agricultural machinery is based on a combination of traditional operations with modern intelligent approaches to quality control. The algorithm of this technology includes 18 steps that ensure the use of machine vision for the initial assessment of the level of contamination and the adaptation of the sequence of operations to the actual condition of the surfaces. Additional washing is provided to remove difficult stains and re-control after basic cleaning, which forms a closed cycle of the process, taking into account sensor data, reducing resource consumption and improving environmental safety. The developed method for evaluating washing efficiency consists of six blocks and provides a comprehensive approach to performance analysis, combining surface cleaning criteria, wash water quality, operation duration, and resource consumption into an integrated index. This allows for an objective comparison of washing modes, taking into account technological and economic aspects, and forms the basis for the implementation of automated control systems. As a result of the research, the washing efficiency of

a John Deere 6130R tractor with a Horsch Pronto 6 DC trailer seed drill was evaluated at three levels of contamination. It was found that at a low level, the integral efficiency index reached the highest values due to the optimal ratio of cleaning quality and resource consumption. At the same time, at a high level of contamination, the key factors reducing efficiency are excessive water and energy consumption, as well as increased cycle duration. Further research should be focused on the development of adaptive cyber-physical washing systems capable of optimizing operating modes in real time, taking into account the actual level of contamination, resource consumption, and environmental requirements.

Keywords: washing, agricultural machinery, efficiency, algorithm, method, pollution, cyber-physical system.

Постановка проблеми. У сільськогосподарських підприємствах широко використовується високопродуктивна техніка. Вона працює в умовах підвищеного пилового та ґрунтового навантаження. Трактори, комбайни та причіпні сільськогосподарські машини під час виконання технологічних операцій контактують із вологим ґрунтом, органічними залишками рослин, мінеральними добривами, а також мастильними матеріалами. Унаслідок цього на поверхнях цих машин утворюються щільні нашарування бруду різної природи. Це не лише погіршує технічний стан вузлів та агрегатів сільськогосподарської техніки, а й сприяє розвитку корозійних процесів [15]. Додатковим негативним чинником є накопичення патогенних мікроорганізмів у вологих місцях на техніці. Це створює ризики санітарного характеру, особливо під час транспортування зерна або ж кормів [13].

Традиційні технології миття сільськогосподарської техніки, які ґрунтуються на застосуванні ручних апаратів високого тиску, є недостатньо ефективними за різних рівнів забруднення. Для слабого шару пилу чи ґрунту витрата води часто є надмірною, тоді як за наявності значних масляних або комбінованих нашарувань механічного впливу струменя виявляється недостатньо [5]. Це зумовлює нераціональне використання водних і енергетичних ресурсів та збільшує час обслуговування техніки. Крім того, оператор не завжди може об'єктивно оцінити ступінь забруднення, що призводить до суб'єктивності у виборі режимів миття.

У сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяється використанню сенсорних систем та інтелектуальних алгоритмів для адаптації технологічних режимів до фактичних умов експлуатації [16]. Зокрема, застосування кіберфізичних систем, що поєднують датчики тиску, вологості, каламутності стоків і системи комп'ютерного зору, дозволяє формувати цифровий образ забруднення і на його основі керувати параметрами миття. Це створює передумови для суттєвого підвищення ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення при одночасній економії води та електроенергії [1]. Проте від-

сутній адаптивний метод кількісної оцінки результатів миття, що потребує подальших наукових досліджень. Отже, аналіз та розробка підходу до оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки із використанням кіберфізичних систем за різних рівнів забруднення є досить актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно миття сільськогосподарської техніки виконується з використанням апаратів високого тиску та піноутворювачів. Однак ефективність цих підходів значною мірою залежить від типу й рівня забруднення сільськогосподарської техніки, конструкційних особливостей машин та режимів подачі води або ж реагентів. В опублікованих наукових працях, які стосуються процесів миття техніки, їх автори наголошують на тому, що визначальною є кінетична енергія крапель. Надмірний тиск мийної рідини пошкоджує поверхні, недостатній – не забезпечує десорбції бруду. Також окремі науковці рекомендують діапазони тисків і витрат рідини, які в подальшому використовують в автоматизації процесу миття техніки [17]. Наявні практичні настанови для фермерських господарств щодо миття техніки. У них робиться акцент на безпеку, біозахист, а також черговість виконання окремих операцій щодо миття техніки. Основний цикл миття сільськогосподарської техніки передбачає виконання операцій «очистити – помити – продезінфікувати (за потреби)» [5; 7].

На сьогодні формується дослідницький напрям, де науковці використовують засоби комп'ютерного зору та сенсори для створення «карт забруднення», що забезпечують використання технологій адаптивного керування миттям техніки. Системи миття техніки з глибинним навчанням уже демонструють точне виявлення і сегментацію бруду на складних фонах. Це дозволяє адресно змінювати траєкторії струменів і режими подачі мийної рідини [5]. У кіберфізичних системах для АПК (CPS/CAS) використовують сенсорні мережі, моделі стану та виконавчі модулі. Їх поєднують через обчислювальний рівень, де алгоритми (нечітка логіка та машинне навчання (ML))

забезпечують адаптацію процесу до поточного стану об'єкта [3; 13]. Такі підходи можна використовувати для оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки. Зокрема, сенсори забруднення стоків та якості води (NTU, за ISO 7027) дають кількісні критерії завершення циклу та економії ресурсів [10; 101].

Аналіз нормативно-методичних матеріалів з біобезпеки підкреслює, що «очищення» і «дезінфекція» – різні, але послідовно взаємодоповнювані етапи. При цьому саме якісне зняття органічного шару визначає результат наступного знезараження. Для сільськогосподарських машин, які працюють із рослинною сировиною або ж ґрунтом, це зумовлює їх забруднення та порушує пожежну безпеку [11]. У публікаціях, які стосуються технологій миття техніки, їх автори описують мобільні автономні комплекси. Вони використовуються для миття техніки (окремі системи з пом'якшенням води, резервуаром і рекуперацією) і доцільні за наявності

окремих майданчиків для обслуговування. Однак вони не мають сенсорного зворотного зв'язку, що зумовлює потребу в досвідчених операторах [12].

З урахуванням зазначеного, існують сучасні тенденції, які зумовлюють перехід від статичних регламентів до адаптивних систем миття, які використовують:

- ✓ комп'ютерний зір для локалізації й ранжування плям із брудом;
- ✓ сенсори тиску / витрати / каламутності для онлайн-індикаторів ступеня очищення;
- ✓ обчислювальні моделі (CPS) для вибору режимів миття техніки.

Саме комбінація цих елементів створює підґрунтя для об'єктивного оцінювання ефективності миття за різних рівнів забруднення і для подальшої економії води, часу та енергії.

Ми виконали аналіз технологій миття сільськогосподарської техніки, результати якого представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Аналіз існуючих технологій миття сільськогосподарської техніки
Table 1. Analysis of existing technologies for washing agricultural machinery

Технологія / рішення	Суть підходу	Переваги	Обмеження	Типові параметри / датчики	Джерела
Ручні апарати високого тиску	Струмінь води / розчину з регульованим тиском і насадками	Дешевизна, мобільність, універсальність	Результат залежить від оператора; ризик неповного миття або пошкодження при неправильному тиску	Тиск 1,4...2,1 МПа, витрата ~7,5 л/хв	[5, 8, 167]
Пінні системи (попереднє змочування)	Нанесення піни – пауза – змив	Краще розм'якшення органіки, менше механічних зусиль	Потребує реагентів і контролю концентрації	pH / концентрація, час експозиції 5...15 хв	[7, 19]
Стационарні пости / бокси	Виділене місце з уловлювачем, фільтрацією, можливо, із підігрівом	Організоване відведення стоків, безпека	Менша мобільність; інвестиції в інфраструктуру	Тиск 0,6...1,2 МПа, фільтрація, підігрів 30...40 °С	[7, 9]
Візуально кероване миття (DL / CV)	Камери + моделі DL для карти забруднень і локального змиву	Адресність обробки, економія води / часу	Потрібне калібрування освітлення; обчислювальні ресурси	2-4 IP-камери, модель сегментації (U-Net / YOLO), FPS 10-30	[6]
CPS-архітектури (сенсори + керування)	Злиття даних (тиск / витрата / NTU) – алгоритм – приводи	Адаптивні режими, автоматичне завершення циклу	Складність інтеграції; потреба в надійних датчиках	Датчики тиску / витрати, NTU за ISO 7027, MQTT / PLC	[2, 4, 18, 21]

Аналізуючи наведені в табл. 1 технології миття сільськогосподарської техніки, ми встановили, що класичні апарати високого тиску залишаються найбільш поширеним і доступним рішенням. Їх перевага полягає в мобільності та простоті експлуатації. Однак результат значною мірою залежить від досвіду оператора. За низького рівня забруднення така технологія є ефективною, однак при щільних мастильних чи комбінованих нашаруваннях її можливості суттєво обмежуються. Власне, відсутність об'єктивного зворотного зв'язку не дозволяє чітко оцінити ефективність миття сільськогосподарської техніки та своєчасно завершити процес, що призводить до перевитрати води й енергії.

Пінні системи забезпечують кращу підготовку поверхні до основного змивання. Особливо це стосується випадків, коли сільськогосподарська техніка забруднена органічними залишками чи налипшими добривами. Їхня сильна сторона – це рівномірне покриття й можливість зменшення механічного навантаження на деталі машини. Водночас використання мийних реагентів піднімає питання екологічної безпеки та потребує додаткового контролю концентрації. Тому вибір цієї технології доцільний за середніх і високих рівнів забруднення. Однак існує потреба в розробці методу оцінки ефективності миття сільськогосподарської техніки, адже суб'єктивна візуальна перевірка не дає точного та об'єктивного результату.

Стаціонарні пости є ефективнішим варіантом, оскільки це дозволяє централізовано відводити та очищати стічні води. Вони зручні в господарствах із великим парком техніки, але суттєвим обмеженням є низька мобільність та значні інвестиційні витрати. При цьому ефективність миття сільськогосподарської техніки залежить від оператора, адже автоматизований контроль рівня забруднення зазвичай відсутній. Тому стаціонарні комплекси варто розглядати в поєднанні із системами сенсорного моніторингу або машинного зору, які б забезпечили об'єктивну оцінку ефективності миття сільськогосподарської техніки.

Найбільш перспективним напрямом є застосування комп'ютерного зору, що дозволяє створювати карту забруднень і здійснювати локальне миття. Це забезпечує економію ресурсів і мінімізує час миття, особливо за низького або середнього рівня забруднення, коли можна уникнути повного миття сільськогосподарської техніки. Водночас такі системи вимагають високих обчислювальних ресурсів, належного калібрування камер та

стійкості до змінних умов освітлення. Саме тут виникає потреба в наявності чітких показників ефективності, які поєднують дані машинного зору зі сенсорами каламутності стоків чи витрати води.

Кіберфізичні системи, що інтегрують датчики й алгоритми керування, фактично задають новий стандарт оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки. Їх перевагою є те, що вони здатні працювати адаптивно – система завершує цикл лише тоді, коли показники чистоти досягають заданого порогу. Таким чином, з одного боку, забезпечується необхідна якість миття техніки, а з іншого – оптимізуються витрати ресурсів. Це особливо важливо у випадках високого рівня забруднення, коли повторні цикли миття є неминучими, і саме адаптивна система може визначити оптимальну кількість цих циклів.

Отже, виконаний аналіз показує, що для розробки методу оцінки ефективності миття сільськогосподарської техніки важливо враховувати специфіку кожної технології. Традиційні методи доцільно застосовувати в поєднанні зі сенсорними чи візуальними системами контролю. Тоді як перспективні рішення на основі кіберфізичних систем дають змогу формалізувати критерії оцінки та автоматизувати процес миття. Саме вони створюють основу для визначення ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення і відкривають шлях до стандартизації підходів у цьому напрямі.

Постановка завдання. Для підвищення ефективності технологічних процесів обслуговування та експлуатації сільськогосподарської техніки пропонується алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення, який є інноваційним інструментом оцінювання та оптимізації стану забруднення цієї техніки. Запропонована технологія ґрунтується на використанні диференційованих режимів миття, що враховують тип і ступінь забруднення, фізико-хімічні характеристики відкладеного бруду та вимоги до кінцевої чистоти поверхонь, які оцінюються за допомогою машинного зору. Це дозволяє зменшити витрати води, мийних реагентів і часу, одночасно забезпечуючи належну якість очищення та підвищення безпеки експлуатації машин.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні алгоритму технології миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення, а також розробленні методу кількісного оцінювання ефективності миття з урахуванням комплексних критеріїв. До таких критеріїв належать рівень видалення

органічних і мінеральних складових бруду, зміна показників забрудненості та рН змивних вод, тривалість операцій і витрати ресурсів. Результати дослідження спрямовані на створення методологічної основи для раціональної організації процесів миття сільськогосподарської техніки та подальшого розроблення і впровадження систем автоматизованого контролю їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Миття сільськогосподарських машин є важливою складовою системи їх технічного обслуговування, оскільки цей процес забезпечує не лише естетичний вигляд, а й безпеку експлуатації, збереження технічних характеристик та зниження ризиків поширення збудників хвороб. Теоретичні основи процесу миття ґрунтуються на принципах масообміну та гідродинаміки, які визначають взаємодію потоку мийного середовища з поверхнею агрегату. Згідно із законом Ньютона для в'язких середовищ, зусилля, що виникають під час змиву, залежать від в'язкості рідини, швидкості її руху та кута атаки струменя:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

де τ – зсувне напруження, Па; μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; $\frac{du}{dy}$ – градієнт швидкості у напрямку нормалі до поверхні.

Для випадку дії струменя під кутом θ до поверхні, ефективна сила змиву F на одиницю площі (тиск з урахуванням кута атаки) описується формулою

$$F = \tau \cdot \cos \theta = \mu \cdot \frac{du}{dy} \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

де θ – кут атаки струменя відносно нормалі до поверхні.

Таким чином, зусилля змиву прямо пропорційне динамічній в'язкості середовища та швидкісному градієнту потоку, а також залежить від геометрії взаємодії струменя з поверхнею.

Отже, вибір параметрів тиску та витрати води є основою для досягнення ефективного миття сільськогосподарської техніки.

Рівень забруднення сільськогосподарської техніки визначається множиною чинників – вид оброблюваної культури, погодні умови, ступень прилипання часток ґрунту та органічних решток до техніки, наявність мастильних матеріалів чи продуктів зносу техніки тощо [13; 21]. Умовно можна виокремити три основні види забруднення сільськогосподарської техніки: 1) слабе (пил, сухі

нашарування); 2) середне (суміш органіки та вологи, що утворює липкий шар); 3) сильне (грубі нашарування ґрунту та залишків рослин з вмістом органічних сполук). Для кожного з цих видів забруднення характерні різні режими миття, які потребують адаптації часу, тиску, температури та використання додаткових реагентів.

Згідно зі сучасними дослідженнями, ефективність миття можна описати коефіцієнтом очищення:

$$E = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де m_0 – маса забруднень до миття; m_1 – маса залишкових забруднень після обробки.

Цей показник дозволяє кількісно оцінити вплив різних технологічних режимів на результат миття сільськогосподарської техніки.

Важливим теоретичним аспектом є також хімічна взаємодія мийних розчинів із забрудненнями на поверхні техніки. Поверхнево-активні речовини знижують міжфазну напругу, що сприяє відриву частинок від поверхні металу або полімерних матеріалів сільськогосподарської техніки. Для органічних нашарувань доцільно застосовувати піноутворювальні реагенти з подальшою паузою для розм'якшення бруду. Тоді як для мінеральних забруднень ефективними є струмені підвищеного тиску та підвищена температура води.

На основі означених положень та доцільності використання машинного зору розроблено алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення (рис. 1). Він передбачає виконання 19 кроків.

Крок 1. Початковий огляд на основі машинного зору. На цьому етапі система формує зображення поверхні машини за допомогою камер. Отримані дані аналізуються для виявлення ділянок забруднень. Для кількісної оцінки вводиться показник:

$$Z = \frac{S_z}{S_t}, \quad (4)$$

де S_z – площа забруднених ділянок, м²; S_t – загальна площа поверхні, м².

Крок 2. Оцінка рівня забруднення. Після цього виконується класифікація рівня забруднення за трьома категоріями – низький ($Z < 0.3$), середній ($0.3 \leq Z < 0.6$), високий ($Z \geq 0.6$). Це визначає подальший режим роботи мийної установки.

Крок 3. Перевірка умови, чи наявний високий рівень забруднення. Алгоритм виконує логічну умову:

$$High = \begin{cases} 1, & Z \geq 0.6, \\ 0, & Z < 0.6. \end{cases} \quad (5)$$

Якщо рівень високий, активується сухе очищення, якщо ні – перехід одразу до етапу підготовки.

Крок 4. Сухе очищення. Видаляються грубі залишки ґрунту й рослинності механічними засобами (щітки, шкребки, стиснене повітря). Це зменшує навантаження на систему миття.

Крок 5. Підготовка до миття. Закриваються чутливі електричні вузли, перевіряється система безпеки, оператор підтверджує готовність.

Крок 6. Попереднє змочування або нанесення піни. На поверхню рівномірно подається вода або мийний розчин.

Крок 7. Експозиція. Витримка розчину протягом $t_{exp} \in [5;15]$ хв, що забезпечує розм'якшення стійких нашарувань із брудом.

Крок 8. Миття високим тиском. Основний процес змивання виконується з регулюванням витрати та тиску:

$$Q = Q_0 + k_Q \cdot Z, \quad (6)$$

$$P = P_0 + k_P \cdot Z, \quad (7)$$

де Q_0 , P_0 – базові параметри; k_Q , k_P – коефіцієнти, що враховують інтенсивність забруднення.

Крок 9. Перевірка умови, чи залишилися стійкі плями. Порівнюється залишкова площа забруднення:

$$\frac{Z_1}{Z_0} > \delta, \quad (8)$$

де Z_1 – площа плям із брудом після миття, m^2 ; Z_0 – початкове значення площі плям із брудом, m^2 ; δ – допустимий поріг (наприклад, 0.1). Якщо умова (8) виконується, запускається додаткове очищення.

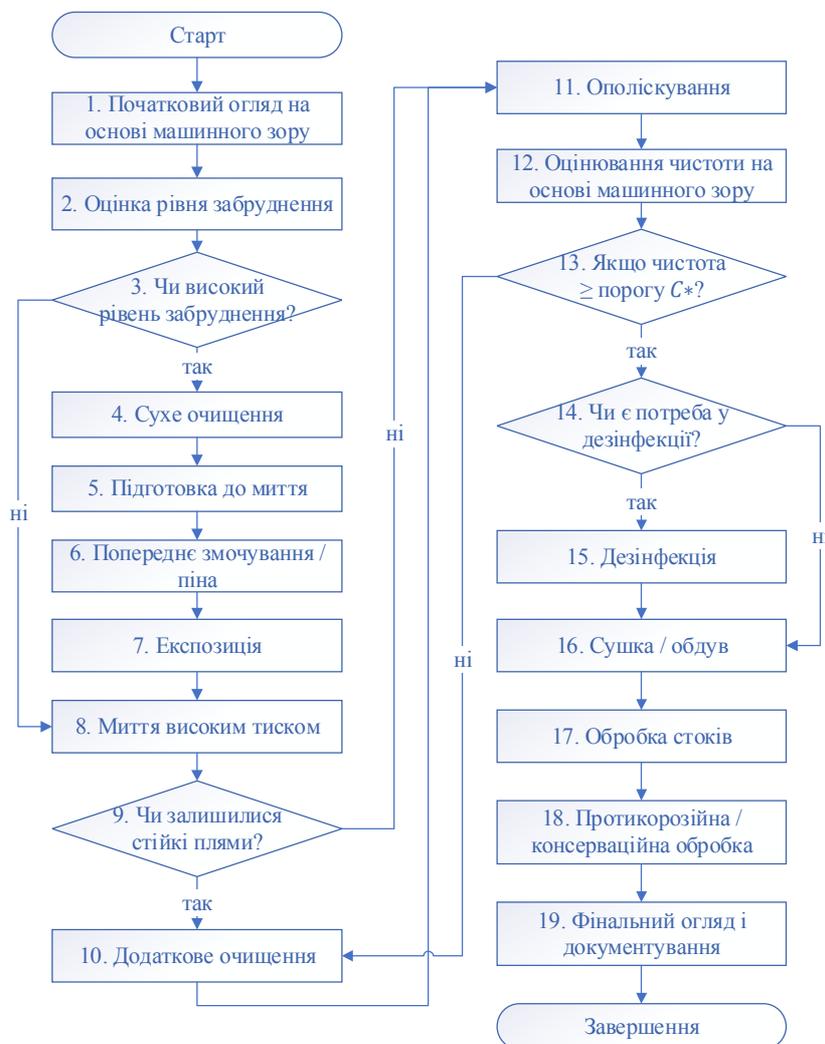


Рис. 1. Алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення
Fig. 1. Algorithm for washing agricultural machinery under different levels of contamination

Крок 10. Додаткове очищення. Локальний змив або застосування щіток у зонах із підвищеною стійкістю нашарувань.

Крок 11. Ополіскування. Подання чистої води для видалення залишків розчинів та бруду.

Крок 12. Оцінювання чистоти на основі машинного зору. У цьому кроці оцінювання чистоти поверхні здійснюється на основі комп'ютерного аналізу за наданими зображеннями. Для цього вводиться індекс машинного зору:

$$C_{mv} = 1 - \frac{D_n}{D_o}, \quad (9)$$

де D_o – площа виявлених забруднень, визначена алгоритмом сегментації перед миттям; D_n – площа забруднень після миття.

Тобто формула (9) описує лише оцінку за візуальними ознаками (машинним зором), пов'язану лише з площею забруднення на поверхні техніки.

Крок 13. Перевірка умови, чи чистота більша або рівна пороговому значенню C^ .* Умова набуває вигляду:

$$C \geq C^*, \quad (10)$$

де C^* – допустимий рівень чистоти техніки (наприклад, 0,9). Якщо умова (10) виконується – перехід до дезінфекції. Якщо ні – цикл повторюється.

Крок 14. Перевірка умови, чи є потреба дезінфекції.

Крок 15. Дезінфекція (за потреби). Виконується нанесення дезінфекційних розчинів для зниження мікробіологічних ризиків.

Крок 16. Сушка або обдув. Видалення залишків вологи за допомогою компресорів або вентиляторів.

Крок 17. Обробка стоків. Відстоювання, фільтрація та утилізація використаної води.

Крок 18. Протикорозійна чи консерваційна обробка. Нанесення спеціальних складів для захисту металевих поверхонь від корозії.

Крок 19. Фінальний огляд і документування. Фотофіксація результату, логування параметрів (тиск, витрата, час, NTU), формування звіту.

У результаті сільськогосподарська машина вважається підготовленою до подальшої експлуатації.

Описаний алгоритм технології миття сільськогосподарських машин, представлений на рис. 1, окреслює послідовність виконання основних операцій залежно від рівня забруднення. Він дає можливість представити загальну логіку процесу із використанням машинного зору. Водночас сам

алгоритм не забезпечує кількісної оцінки досягнутої якості миття. Окрім того, він не дозволяє об'єктивно порівнювати різні режими чи технологічні операції. Саме тому виникає потреба в розробці методу, що ґрунтується на комплексних критеріях і враховує не лише ступінь видалення бруду з поверхні сільськогосподарської техніки, а й хімічні характеристики мийної речовини, витрати ресурсів та тривалість операцій.

Запропонований метод кількісного оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення є логічним продовженням алгоритму його технології. Вона враховує послідовність дій через систему вимірюваних показників і формулює інтегральний індекс, який використовується для автоматизованого контролю кіберфізичних систем.

В основі запропонованого методу є визначення інтегрального показника ефективності миття сільськогосподарської техніки, який враховує не лише зменшення площі забруднень, а й інші параметри. До них належать хімічні характеристики змивних вод, витрати часу та споживання ресурсів. Це дозволяє забезпечити об'єктивну оцінку та формувати основу для впровадження автоматизованих систем контролю. Для цього насамперед аналізується ступінь видалення бруду з поверхні техніки, який визначається за формулою

$$E_z = 1 - \frac{Z_n}{Z_o}, \quad (11)$$

де Z_o – початковий індекс забрудненості; Z_n – залишковий показник після миття.

Додатково враховуються характеристики змивних речовин, адже саме вони відображають інтенсивність процесу та ступінь видалення органіки і мінералів. Зокрема, визначається зміна каламутності та кислотно-лужного балансу змитої речовини. Для цього вводиться індекс:

$$E_w = \frac{C_o - C_t}{C_o}, \quad (12)$$

де C_o – початковий рівень забрудненості води, NTU або мг/л; C_t – значення рівня забрудненості води після завершення процесу.

Значення рН додатково використовується для контролю залишків мийних засобів, оскільки відхилення від нейтрального середовища свідчить про недостатнє ополіскування.

Для ефективної організації процесів миття велике значення має тривалість виконання операцій. Час, витрачений на повний цикл, порівнюється з гранично допустимим значенням, яке визначається технологічними регламентами:

$$E_t = 1 - \frac{t}{t_{max}} \quad (13)$$

Якщо миття сільськогосподарської техніки займає занадто багато часу, індекс знижується, навіть за умови досягнення високого рівня чистоти. Це зумовлює пошук оптимального співвідношення між якістю та швидкістю миття сільськогосподарської техніки.

Не менш важливими є чинники витрат ресурсів – води та електроенергії. Для їх інтеграції у спільну систему оцінювання використовується формула

$$E_r = 1 - \frac{\alpha Q + \beta W}{Q_{max} + W_{max}}, \quad (14)$$

де Q – витрата води; W – споживання енергії; α і β – вагові коефіцієнти залежно від того, який ресурс є вагомим для конкретного господарства.

Узагальнений індекс ефективності миття сільськогосподарської техніки визначається як зважена сума часткових показників:

$$E_{int} = w_1 E_z + w_2 E_w + w_3 E_t + w_4 E_r, \quad (15)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти впливу чинників на ефективність миття сільськогосподарської техніки.

При цьому $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$. Вибір ваг дозволяє адаптувати процес оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин до конкретних виробничих умов. Зокрема, у разі жорстких санітарних вимог більшу вагу отримують параметри чистоти та хімічних показників, а в умовах дефіциту води основним стає ресурсний індекс.

Структура методу оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин представлена у вигляді схеми (рис. 2), де відображено, як вхідні дані із сенсорів та системи машинного зору об'єднуються в обчислювальному модулі, а на виході формується інтегральний індекс ефективності.

Розглянемо структурну схему методики оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення, яка складається з шести блоків.

Блок 1. Дані зі сенсорів забрудненості (каламутність, рН). Цей блок збирає показники з датчиків, встановлених у системі збору та відведення змивної води. Значення каламутності (NTU) характеризує концентрацію завислих часток, тоді як рН дає змогу оцінити нейтралізацію мийних засобів та наявність кислотних або лужних залишків.

Блок 2. Машинний зір (аналіз площі забруднення). Використання камер та алгоритмів комп'ютерного аналізу зображень дозволяє визначати частку поверхні, покритої органічними чи мінеральними нашаруваннями. Це дає змогу кількісно оцінювати індикатор Z , який використовується для подальшого розрахунку ефективності очищення.

Блок 3. Час і тривалість операцій. Цей блок забезпечує фіксування загальної тривалості циклу миття сільськогосподарської техніки від початкового огляду до фінального ополіскування. Порівняння фактичного часу з нормативним дозволяє визначати індекс E_t , що враховує продуктивність процесу миття.

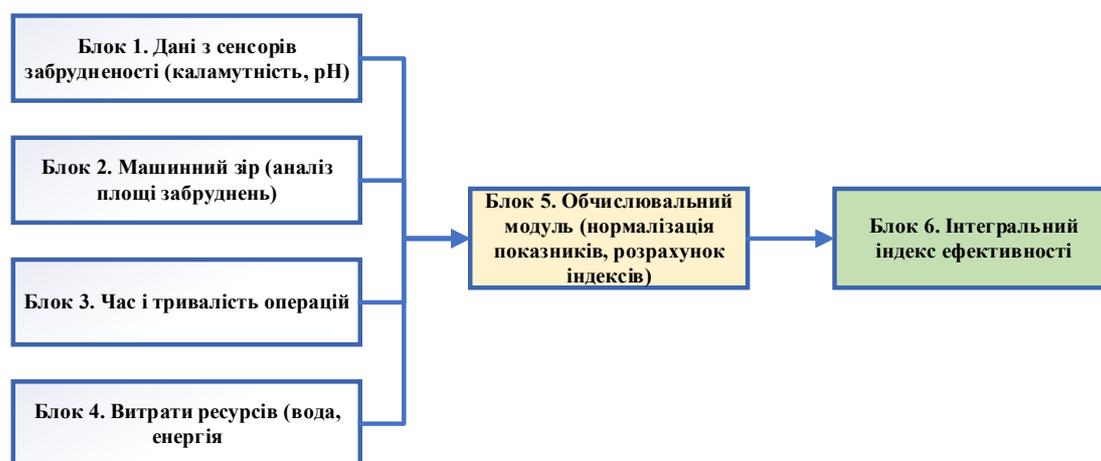


Рис. 2. Структурна схема методу оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення

Fig. 2. Structural diagram of the method for evaluating the effectiveness of washing agricultural machinery under different levels of contamination

Блок 4. Витрати ресурсів (вода, енергія). У цьому блоці розраховується кількість використаної води та електроенергії. Отримані дані нормалізуються, щоб оцінити ефективність витратних компонентів, які в багатьох господарствах є обмеженими.

Блок 5. Обчислювальний модуль (нормалізація показників, розрахунок індексів). Він є основним блоком. Тут здійснюється обробка даних з усіх попередніх блоків, нормалізація значень у межах від 0 до 1 та формування часткових індексів E_z, E_w, E_t, E_r . Після цього за допомогою вагових коефіцієнтів розраховується інтегральний індекс ефективності.

Блок 6. Інтегральний індекс ефективності. У цьому блоці визначається індекс E_{int} , який є вихідним результатом оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення. Він є безрозмірною величиною, що показує загальну ефективність миття з урахуванням усіх вищеописаних критеріїв. Якщо E_{int} перевищує встановлений поріг E_{int}^* , то миття сільськогосподарської техніки вважається успішним, а не то запускається повторний або локальний цикл миття сільськогосподарської техніки.

На підставі використання запропонованого методу виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R із причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за різних рівнів забруднення: 1) після легкого пилу на сухому ґрунті (низький); 2) після оранки на вологому ґрунті (середній); 3) після переміщення агрегату та робіт на перезволоженому ґрунті за умов випадіння опадів перед поверненням до господарства, із наявністю залишків добрив на сошниках (високий рівень).

Для кожного сценарію визначали площу забруднених поверхонь до та після миття машинно-тракторного агрегату, аналізували каламутність і рН змивної води, фіксували тривалість циклу та витрати води й електроенергії. Для забезпечення коректності оцінювання ефективності миття було проведено експериментальні вимірювання параметрів забруднення та процесу очищення під час миття трактора John Deere 6130R із причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC. Усі вимірювання виконувалися за уніфікованою процедурою, що передбачає визначення площі забруднення, характеристик змивної рідини та показників витрат ресурсів. Для визначення початкових і залишкових площ забруднених зон використовувався метод машинного зору з подальшою сегментацією зображень. Фотофіксація здійснювалася камерою

Sony Alpha A6000 (24 Мп) під кутом 90° відносно поверхні, при стабільному освітленні 5500 К. Оброблення виконували у середовищі Python / OpenCV. Площі визначалися за алгоритмом порогової сегментації та морфологічної фільтрації, після чого контури забруднень перераховувалися у реальні площі на основі метричного калібрування. Показники NTU вимірювали портативним турбідиметром Nach 2100Q, який забезпечує діапазон 0...1000 NTU з точністю $\pm 2\%$. Зразки відбирали на початку та в кінці циклу миття з ємності для збору стоків. Перед вимірюванням виконувалося калібрування приладу стандартними розчинами формазину. Рівень кислотності визначали цифровим рН-метром Hanna HI9812-5, призначеним для польових вимірювань. Електрод перед тестуванням промивали дистильованою водою та калібрували у буферних розчинах рН 4.01, 7.00 і 10.01. Вимірювання проводили негайно після відбору проби. Витрати води визначали за допомогою імпульсного водолічильника Powogaz JS 1.6, під'єданого на вході мийної установки. Дані знімали у вигляді накопиченого об'єму за цикл. Споживання електроенергії фіксувалося окремим лічильником DDSU666-H, що дозволяє реєструвати миттеву та сумарну активну енергію під час роботи насоса, компресора та системи освітлення. Час виконання операцій фіксували секундоміром та дублювали у лог-файлі програми керування мийною установкою. Отримані результати розрахунку ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC наведено в табл. 1.

Для коректного визначення узагальненого індексу ефективності миття техніки було визначено числові значення вагових коефіцієнтів, які характеризують відносну важливість кожного часткового індикатора для досліджуваного технологічного процесу. Вибір ваг ґрунтувався на поєднанні експертних оцінок (три фахівці з виробничого підрозділу господарства) та аналізі нормативних вимог щодо санітарного стану сільськогосподарської техніки. З урахуванням того, що пріоритетним завданням є досягнення необхідної чистоти техніки та дотримання санітарних вимог, найбільшу питому вагу було надано показникам очищення поверхні та якості змивної рідини. Менший, але суттєвий внесок мають тривалість миття та витрати ресурсів, оскільки їх відхилення впливають на економічну доцільність операцій. Вагові коефіцієнти було прийнято такими для індексу: 1) очищення поверхні – $w_1 = 0,4$; 2) каламутності та хімічної якості змивної води – $w_2 = 0,25$; 3) тривалості миття – $w_3 = 0,2$; 4)

витрат води та електроенергії – $w_4 = 0,15$. Сума вагових коефіцієнтів становить одиницю:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1,00.$$

Запропоновані значення ваг відображають реальні виробничі пріоритети. Зокрема, забезпечення чистоти та дотримання хімічної безпечності є критичним для санітарної експлуатації, тоді як ресурсомісткість і тривалість циклу миття розглядаються як оптимізаційні параметри другого рівня. У разі зміни технологічних умов коефіцієнти адаптуються до процесу миття техніки, однак у наведеному дослідженні використані саме зазначені значення.

Таблиця 2. Результати розрахунку ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC

Table 2. Results of calculating the washing efficiency of a John Deere 6130R tractor with a Horsch Pronto 6 DC seed drill

Рівень забруднення	Ситуація	Z_o	Z_n	E_z	Каламутність (NTU), до миття → після миття	E_w	Час, хв	E_t	Вода, л / енергія, кВт·год	E_r	E_{int}
Низький	Пил після сухого поля	0,20	0,02	0,90	220 → 30	0,86	15/30	0,50	100 / 0,5	0,70	0,80
Середній	Робота на вологому ґрунті	0,45	0,08	0,82	350 → 65	0,81	28/30	0,07	200 / 1,0	0,40	0,63
Високий	Із наявністю залишків добрив на сошниках	0,70	0,15	0,79	480 → 120	0,75	38/40	0,05	280 / 1,5	0,15	0,53

Для середнього рівня забруднення спостерігається помітне падіння інтегрального показника до $E_{int} = 0,63$. Хоча індекс видалення нашарувань і залишився на прийнятному рівні $E_z = 0,82$, істотне зростання часу миття (28 хв) і витрати ресурсів негативно позначилися на результаті. Це свідчить про потребу у використанні попередніх етапів. Наприклад, механічного очищення або піноутворення, що дозволить знизити навантаження на основне миття високим тиском.

Найгірші показники зафіксовані для високого рівня забруднення, де інтегральний індекс не перевищив $E_{int} = 0,53$. Попри те, що майже 79 % забруднень було видалено, саме значні витрати води (280 л) та тривалість процесу (38 хв) істотно знизили загальну ефективність. У цьому випадку доцільно застосовувати комбіновані рішення. Зокрема, поєднання сухого очищення, використання мийних реагентів і адресного змиву найбільш забруднених ділянок за допомогою машинного зору. Це дозволить скоротити витрати та зменшити загальний час роботи.

Отримані дані підтверджують, що за низького і середнього рівнів забруднення достатньо застосовувати стандартні режими миття, тоді як

Аналіз результатів, наведених у табл. 2, показує, що ефективність миття сільськогосподарської техніки суттєво залежить від початкового рівня забруднення. У разі легкого пилу на поверхні трактора та сівалки вдалося досягти високого індексу очищення $E_z = 0,9$, а інтегральний показник ефективності становив $E_{int} = 0,8$. Це зумовлено невеликими витратами часу (15 хв) та помірним використанням води й електроенергії. Такий сценарій можна вважати оптимальним з погляду співвідношення витрат і результатів.

для високого рівня забруднення потрібна оптимізація процесу з акцентом на підготовчі операції та раціональне використання ресурсів.

У процесі оцінювання ефективності миття техніки спостерігається взаємозв'язок між тривалістю циклу, витратою води та споживанням електроенергії. Чим довше триває миття, тим більшим є сумарне споживання ресурсів. Разом з тим час операції виконує не лише допоміжну функцію, а є самостійною характеристикою технологічного процесу, що впливає на продуктивність мийних робіт, здатність господарства обслуговувати наявну кількість техніки за добу та відповідність регламентам технічної експлуатації. Саме тому час миття доцільно розглядати як окремий чинник. Його роль виходить за межі простого відображення обсягів ресурсів. Навіть за невеликих витрат води й електроенергії надмірна тривалість операції знижує продуктивність системи та є непринятною в польових умовах. Час є обмежувальним параметром для технологічних процесів, де слід забезпечити швидку зміну агрегатів або їхнє повернення до виконання польових робіт. Включення тривалості циклу миття до загальної моделі дає можливість комплексно оцінювати якість миття, поєднуючи санітарні вимоги, ресурсну ефективність та

оперативність технологічних операцій. Водночас витрати води та електроенергії, незважаючи на часткову залежність від часу, залишаються окремими показниками, оскільки вони відображають технічні характеристики обладнання (продуктивність насоса, тиск, інтенсивність подачі) і можуть змінюватися незалежно від загальної тривалості циклу миття.

На рис. 3 наведено діаграму, що відображає часткові індекси E_z, E_w, E_t, E_r для кожного сценарію миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC. Вона наочно показує, що за високого рівня забруднення основним чинником зниження інтегрального показника є низькі значення E_t і E_r , тоді як якість миття поверхонь E_z залишається досить високою.

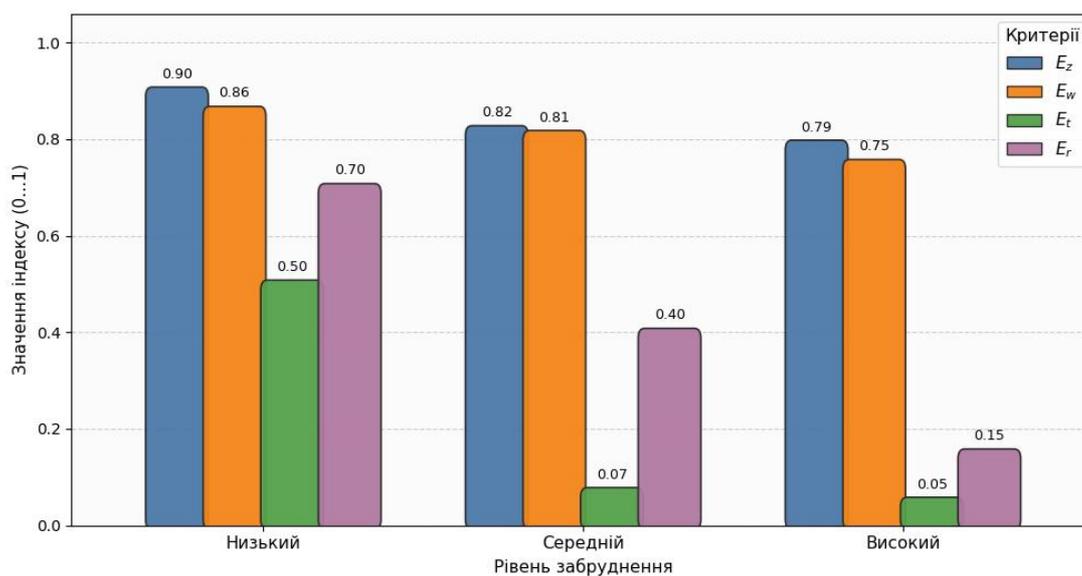


Рис. 3. Тенденції зміни часткових індексів ефективності миття для різних рівнів забруднення
Fig. 3. Trends in changes of partial washing efficiency indices for different levels of contamination

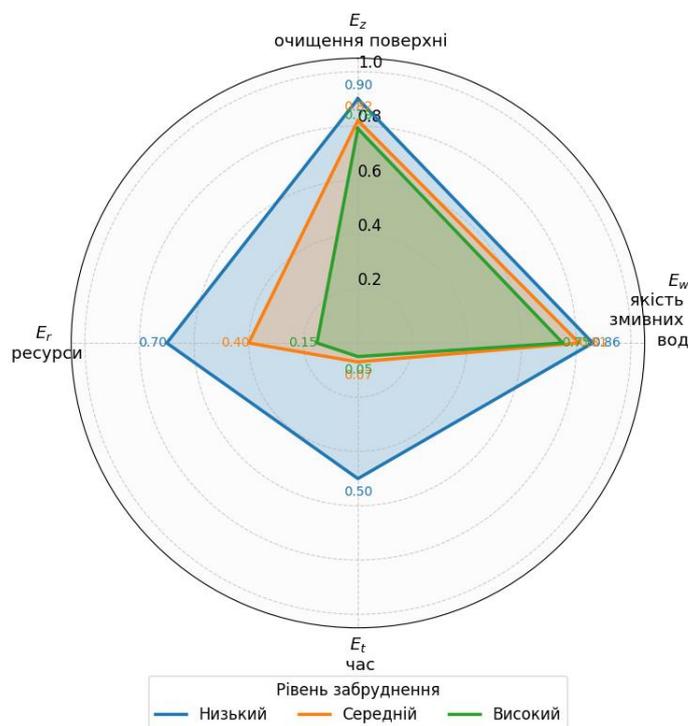


Рис. 4. Радар-графік порівняння ефективності миття за всіма критеріями для різних рівнів забруднення
Fig. 4. Radar chart comparing washing performance across all criteria for different levels of contamination

Для більш комплексної оцінки ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC було побудовано радар-графік (рис. 4). Він дозволяє одночасно порівняти ефективність миття за всіма критеріями, оскільки відображає баланс між якістю миття, очищенням змивних вод, тривалістю процесу та витратами ресурсів.

Представлений графік відображає, що за низького рівня забруднення інтегральний показник $E_{int} = 0,8$ демонструє оптимальний баланс – висока якість очищення, помірні витрати ресурсів і короткий час миття техніки. Для середнього рівня забруднення інтегральний показник знижується $E_{int} = 0,63$ в основному через збільшення тривалості циклу миття та споживання води. У разі високого рівня забруднення спостерігається найменше значення інтегрального показника $E_{int} = 0,53$, що зумовлено значними витратами ресурсів та часу. Це свідчить про потребу вдосконалення системи подачі води та локалізації змиву.

Запропонований метод оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення ґрунтується на комплексному підході. Він враховує не лише ступінь видалення нашарувань з поверхонь, а й якість змивних вод, тривалість виконання операцій та витрати ресурсів. Використання інтегрального показника ефективності дозволяє поєднати окремі критерії в єдину систему, що забезпечує об'єктивність і системність результатів у різних сценаріях миття техніки. Використання запропонованого методу створює передумови для розроблення систем автоматизованого контролю на основі сенсорних технологій та машинного зору, що дає змогу підвищити рівень біобезпеки, знизити витрати води та енергії, а також оптимізувати організацію процесів миття техніки у сільськогосподарських підприємствах. У подальшому цей метод є основою для впровадження кіберфізичних систем, здатних у режимі реального часу адаптувати режими миття до фактичного стану забруднення сільськогосподарської техніки, що підвищить ефективність та екологічну безпечність процесів миття сільськогосподарської техніки.

Висновки. 1. Виконаний аналіз існуючих технологій та підходів до миття сільськогосподарської техніки показав, що, попри їхню поширеність, вони мають як переваги, так і суттєві обмеження. Зокрема, більшість методів зосереджується на окремих показниках, таких як витрати води чи ступінь очищення поверхонь. Однак вони

не враховують комплексного впливу часу, енергетичних витрат та якості змивної води. Це свідчить про доцільність удосконалення технології миття сільськогосподарської техніки та розробки методу, який дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність зазначеного процесу за різних рівнів забруднення.

2. Удосконалена технологія миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення ґрунтується на поєднанні традиційних операцій миття із сучасними інтелектуальними підходами до контролю якості. Запропонований алгоритм цієї технології (див. рис. 1) передбачає виконання 18 кроків, які базуються на використанні машинного зору для початкового огляду техніки та оцінювання рівня забруднення, що дозволяє адаптувати послідовність операцій миття сільськогосподарської техніки залежно від фактичного стану її поверхонь. Важливою особливістю цієї технології є інтеграція блоку додаткового миття для видалення стійких плям, а також застосування повторного контролю після основного миття. Це дає змогу забезпечити високий рівень чистоти перед наступними операціями – дезінфекцією, сушінням, обробкою стоків та протикорозійною консервацією. Зазначена технологія формує замкнений цикл із гнучкою адаптацією до рівня забруднення, використанням сенсорних даних та машинного зору для оцінювання якості виконаних операцій, що забезпечує раціональне використання ресурсів, скорочення часу та підвищення екологічної безпеки процесу миття сільськогосподарської техніки.

3. Розроблений метод оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення складається з шести блоків, які забезпечують комплексний підхід до аналізу результативності процесу, поєднуючи критерії оцінювання видалення нашарувань, зміни характеристик змивних вод, тривалості операцій та витрат ресурсів у єдиний інтегральний індекс. Такий підхід дозволяє об'єктивно порівнювати різні режими миття, враховуючи не лише кінцевий візуальний результат, а й технологічні та економічні аспекти. Запропонований метод лежить в основі впровадження систем автоматизованого контролю та адаптивного керування процесом миття сільськогосподарської техніки, які здатні коригувати параметри зазначеного процесу в реальному часі залежно від рівня забруднення та умов експлуатації техніки. Застосування цього методу сприяє підвищенню ефективності використання водних і енергетичних ресурсів, забезпечує задану якість миття та зростання екологічної й біобезпекової складових зазначеного процесу.

4. На підставі використання запропонованого методу виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R в агрегаті з причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за різних рівнів забруднення. Встановлено, що за низького рівня забруднення (після легкого пилу на сухому ґрунті) інтегральний показник ефективності миття становив $E_{int} = 0,8$, що відображає оптимальне поєднання високого ступеня очищення поверхні ($E_z = 0,9$) і помірних витрат ресурсів ($E_r = 0,7$). Для середнього рівня забруднення (після оранки на вологому ґрунті) значення інтегрального показника знизилася до $E_{int} = 0,63$ при збереженні високого рівня очищення поверхні ($E_z = 0,82$), але за значного збільшення часу операцій ($E_t = 0,07$) та витрат води й енергії ($E_r = 0,4$). Найнижча ефективність процесу миття спостерігається за високого рівня забруднення (після переміщення агрегату на перезволоженому ґрунті за умов випадіння опадів та за наявності залишків добрив на сошниках), де інтегральний показник ефективності становив лише $E_{int} = 0,53$. У цьому випадку, попри високий ступінь очищення ($E_z = 0,79$), спостерігаються низькі значення індексів часу ($E_t = 0,05$) та ресурсів ($E_r = 0,15$), що значно знижує загальну ефективність процесу миття техніки. Отримані кількісні результати підтверджують, що найважливішими чинниками за високого рівня забруднення техніки є надмірні витрати води та енергії, а також тривалість циклу, що вимагає оптимізації підготовчих операцій і режимів миття сільськогосподарської техніки. Подальші дослідження слід проводити в напрямі розроблення адаптивних кіберфізичних систем миття сільськогосподарської техніки, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи з урахуванням рівня забруднення, витрат ресурсів та екологічних вимог.

Бібліографічний список

1. Крупецьких В. П., Домарацький О. О., Ревтьо О. Я. Ефективність використання машинно-тракторних агрегатів у рослинництві. *Таверійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 96–104. doi: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.13>.
2. Adaptive Pressure Control System Based on the Maximum Power Transfer Theorem for Water Supply Systems / T. K. S. Flores, L. A. F. Magalhães, P. C. Cortez, A. H. Brito. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 3. doi: <https://doi.org/10.3390/s21155156>.
3. Application of sarima models in information systems forecasting seasonal volumes of food raw materials of procurement on the territory of communities / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. No. 3295. P. 64–75.
4. Batyuk B., Dyndyn M. Coordination of configurations of complex organizational and technical systems for development of agricultural sector branches. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 2, No. 2. P. 63–76.
5. DeCooman C. Prioritize safety when using pressure washers. *AgProud*. 2023. URL: <https://www.agproud.com/articles/58447-prioritize-safety-when-using-pressure-washers>. (дата звернення: 21.01.2025).
6. Deep learning for automated visual inspection in manufacturing and maintenance: A survey of open-access papers / N. Hütten et al. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 11. doi: <https://doi.org/10.3390/asi7010011>.
7. Evaluation of cleaning and disinfection protocols for commercial farm equipment following a foreign animal disease outbreak / Boe T. et al. *Remediation Journal*. 2023. Vol. 33, No. 3. P. e21762. doi: <https://doi.org/10.1002/rem.21762>.
8. Forecasting the risk of the resource demand for dairy farms basing on machine learning / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. No. 2631. P. 327–340.
9. Innovative carwash wastewater treatment and reuse through nature-based solutions / A. Torrens, P. Sepúlveda-Ruiz, M. Aulinas, M. Folch. *Clean Technologies*. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 12. doi: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7010012>.
10. In-situ optical water quality monitoring sensors-applications, challenges, and future opportunities / M. Kumar, K. Khamis, R. Stevens, D. M. Hannah. *Frontiers in Water*. 2024. No. 6. P. 1380133. doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>.
11. ISO 7027-1:2016. Water quality – Determination of turbidity – Part 1: Quantitative methods. Geneva: ISO, 2016.
12. Jensen T. A., Antille D. L., Tullberg J. N. Improving on-farm energy use efficiency by optimizing machinery operations and management: A review. *Agricultural Research*. 2025. No. 14. P. 15–33. doi: <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00824-5>.
13. Microbial Inoculants in Sustainable Agriculture: Advancements, Challenges, and Future Directions / A. M. Díaz-Rodríguez et al. *Plants*. 2025. Vol. 14, No. 2. P. 191. doi: <https://doi.org/10.3390/plants14020191>.
14. Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters / Krklješ D. B. et al. *Sensors*. 2023. No. 23. P. 6396. doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3368560>.
15. Nasr G., Abdel Hamid Z., Refai M. Agricultural Machinery Corrosion. *Agricultural Machinery Corrosion. IntechOpen*. 2023. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108918>.
16. Overview of Agricultural Machinery Automation Technology for Sustainable Agriculture / L. Jiang, B. Xu, N. Husnain, Q. Wang. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, No. 6. P. 1471. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061471>.
17. Process engineering variables in the spray washing of meat and produce / L. O. Pordesimo,

E. G. Wilkerson, A. R. Womac, C. N. Cutter. *Journal of Food Protection*. 2002. Vol. 65, No. 1. P. 222–237. doi: <https://doi.org/10.4315/0362-028x-65.1.222>.

18. Real-Time Control of Urban Water Cycle under Cyber-Physical Systems: Framework, Interoperability and Case Study in Barcelona / C. Sun, L. Shu, X. Gu, D. Li, W. Li. *Water*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 406. doi: <https://doi.org/10.3390/w12020406>.

19. Stubenrauch C., Drenckhan W. Cleaning solid surfaces with liquid interfaces and foams: From theory to applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2024. No. 72. P. 101818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101818>.

20. Tomašková M., Sobotova L., Matiskova D. Machinery Fire in Agriculture and its Impact on the

Environment. *International Council on Technologies of Environmental Protection (ICTEP)*, October 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/ICTEP48662.2019.8968991>.

21. Tryhuba A., Tryhuba I., Bashynsky O. Conceptual model of management of technologically integrated industry development projects. *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. P. 155–158. doi: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321903>.

22. Tyrovolas M., Hajnal T. Inter-communication between Programmable Logic Controllers using IoT technologies: A Modbus RTU/MQTT. 2021. Approach. arXiv preprint arXiv: 2102.05988. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.05988>.

Стаття надійшла 25.01.2025

АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ WES-МЕТОДИКИ

*Любомир Крайник, д. т. н., професор, Петро Сивулька, аспірант
Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл.
e-mail: l.krainyk@gmail.com; petr1111@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.48-56>

Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики

Активне розповсюдження важких машинно-тракторних агрегатів (МТА) зумовлює загострення проблеми переущільнення аграрних угідь і оперативної оцінки агроекологічності МТА на базі сучасного розвитку методів та інструментарію террамеханіки. Складність і тривалість оцінки впливу МТА на ущільнення ґрунту згідно з нормативною базою, опрацьованою понад 30 років тому, зумовлює актуальність її оновлення на базі сучасного розвитку оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту як опорної поверхні та впливу МТА.

Заслуговує на увагу так звана WES-методика інженерного корпусу армії США, що стала базовою в країнах НАТО для оцінки характеристик ґрунту / бездоріжжя та прохідності і мобільності руху техніки бездоріжжям. В основі оцінки стану ґрунту – твердість із оперативним визначенням пенетрометром із стандартизованим наконечником – значення так званого конусного індексу CI (cone index) та опрацьована методологія розрахунку прохідності та мобільності руху ґрунтовими поверхнями колісних і гусеничних машин. Окрім цього, враховується ефект доущільнення ґрунту колесами наступних після першої осей, зміна тиску в шинах та інші параметри машини. Звісно, для аграрної техніки необхідне ще врахування різних типорозмірів коліс передньої та задньої осей і динаміки зміни навантажень на осі для виконання операцій з обробітку ґрунту.

Проведено експериментальні дослідження (на прикладі трактора Fendt 1038 Vario з різними типорозмірами коліс передньої і задньої осей) та замірами твердості ґрунту у системі конусного індексу CI і плям контакту шин із ґрунтом. Отримані результати підтверджують сильний кореляційний зв'язок твердості та щільності ґрунту. Проаналізовано результати інших польових досліджень, де наявні дані щодо замірів твердості та щільності інших типів ґрунту, статистична обробка даних яких теж підтвердила факт сильної кореляції цих показників. Це дозволяє пропонувати і відповідні зміни до нормативної бази щодо агроекологічної оцінки МТА, що значно прискорює процес оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту.

Ключові слова: агроекологія, машинно-тракторні агрегати, ущільнення ґрунту, твердість ґрунту, пенетрометр, конусний індекс (CI).

Krainyk L., Syvulka P. Agroecological assessment of machine-tractor units based on WES methodology

The increasing use of heavy machine-tractor units (MTUs) is exacerbating the issue of excessive soil compaction in agricultural land. This highlights the urgent need for a rapid and reliable assessment of their agro-environmental performance, particularly with the advancements in terramechanics theory and instrumentation. The complexity and lengthy processes involved in evaluating the impact of MTUs on soil compaction, guided by regulatory standards established over thirty years ago, underscore the necessity for revising these methodologies. A modern approach to assessing the physical and mechanical properties of soil as a load-bearing surface, along with its interaction with MTUs, is essential.

In this context, special attention should be given to the WES methodology, developed by the U.S. Army Corps of Engineers. This approach has become a benchmark for NATO countries in characterizing soil and off-road properties, as well as in determining the cross-country mobility of ground vehicles. The WES methodology is based on the operational assessment of soil strength using a standardized cone penetrometer, which produces the Cone Index (CI). This is combined with a validated computational framework that predicts the passability and mobility of wheeled and tracked vehicles over unpaved terrain. Additionally, it considers secondary compaction caused by the wheels of successive axles, variations in tire inflation pressure, and other machine-specific parameters. For agricultural machinery, it is also important to consider variations in the dimensions of the front and rear wheels, as well as the dynamic redistribution of axle loads during soil tillage operations. Experimental studies using the Fendt 1038 Vario tractor, with different wheel sizes on the front and rear axles, have been conducted. These studies measured soil hardness based on the Cone Index (CI) system and tire-soil contact patches. The results revealed a strong correlation between soil hardness and soil density. A review and analysis of additional field studies containing hardness and density data for various soil types further confirmed this correlation. This information allows for proposing necessary amendments to the existing regulatory framework for the agroecological assessment of agricultural machine-tractor units, significantly accelerating the evaluation of soil physical and mechanical properties.

Keywords: agroecology, machine-tractor unit (MTUs), soil compaction, soil hardness, penetrometer, Cone Index (CI).

Постановка проблеми. Інтенсифікація механічної обробки аграрних угідь високопродуктивними, важкими МТА обумовила загострення проблеми переущільнення і деградації ґрунту [21], що, у свою чергу, робить актуальним оперативність агроecологічної оцінки конкретних МТА для поточного стану ґрунту. Нормативна база [6-8], основи якої опрацьовані ще у 1980-х роках, вимагає лабораторних методів оцінки стану ґрунту, є тривалою і практично не використовується у реальній практиці роботи фермерських господарств та агрохолдингів. Розвиток методів та інструментарію оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів упродовж останніх 30 років на базі замірів твердості, насамперед у ЄС та США, що поширюється і в Україні [12; 26], обумовлює актуальність і розвиток оперативності агроecологічної оцінки МТА в конкретних ситуаціях. Аналіз сучасних досліджень та нормативної бази у сфері агроecології [22] дозволяє констатувати реалії використання оцінки несучої здатності ґрунтів на базі так званої WES-методології (Waterway Experimental Station) Інженерного корпусу армії США (US Army Corps of Engineer). Започаткована ще з Другої світової війни, введена як нормативна база в арміях НАТО, вона вигідно вирізняється від досліджень у аграрній та лісогосподарській сферах опрацьованими емпіричними даними та залежностями оцінки динаміки руху колісних і гусеничних машин на ґрунтових поверхнях [4; 35]. Оцінка несучої здатності ґрунту базується на стандартизованій геометрії конусного наконечника пенетрометра [32] – отриманих значень так званого «конусного індексу» CI, що лежить в основі відповідних розрахункових залежностей прохідності, мобільності (потенційно можливих максимальних швидкостей руху) та відповідної деформації ґрунту (колії) [4; 35]. Оперативність оцінки твердості ґрунту (порівняно із щільністю, як базового параметра ґрунту у вітчизняній нормативній базі) і детально опрацьована WES-методика моделювання руху машин і взаємодії коліс із ґрунтовими поверхнями, що деформуються, обумовлюють доцільність розгляду можливого використання цих напрацьованих для експрес-оцінки агроecологічності МТА в конкретних ситуаціях. Тим паче, один з авторів наявної нормативної бази [6-8] – акад. НААНУ, проф. Медведєв В. В., віднедавна акцентує власне на твердості ґрунту як одного з визначальних параметрів, що безпосередньо пов'язаний із щільністю ґрунту [24; 27]. Остання – щільність – власне і покладена в основу нормативної

агроecологічної оцінки МТА, однак визначення її передбачає лабораторний і тривалий процес [2; 9]. Водночас нормативно визначена оцінка твердості ґрунту твердоміром Ревякіна сформована під взаємодію ґрунтообробних знарядь із ґрунтом (домінанта зсуву) і не є коректною щодо механізму взаємодії колеса з ґрунтовою опорною поверхнею (домінанта вертикальної деформації) [22; 10]. Очевидна доцільність прийняття в Україні як ДСТУ стандарту ISO [32], що є загальноприйнятим у країнах ЄС (а з 2019 р. уже і у РФ як ГОСТ Р), та нормативне узаконення вже існуючої практики виробництва й використання пенетрометрів в Україні, тим паче в умовах війни і гармонізації нормативної бази з НАТО щодо військової авто техніки [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Очевидний кореляційний взаємозв'язок значень твердості та щільності ґрунту підтверджено як у вищезгаданих працях акад. НААНУ В.В. Медведєва, так і в низці сучасних досліджень, що безпосередньо не пов'язані з агроecологією, але де наведені дані оцінки твердості і щільності ґрунту на досліджуваних полях [1; 11; 20; 24; 27]. Найдетальніше це питання опрацьовано в публікації [1], де представлена графічна залежність взаємозв'язку обох параметрів (рис. 1), та наведено відповідну нелінійну кореляційну залежність:

$$\rho = -0,0547H^2 + 0,5592H + 0,1629 \quad (1)$$

Аналогічного характеру залежність наведена й у праці [14]:

$$\rho = 0,692 + 0,042H - 0,031H^2 \quad (2)$$

де H – твердість ґрунту, визначена за методикою Ревякіна [10], МПа; ρ – щільність ґрунту, $г/см^3$;

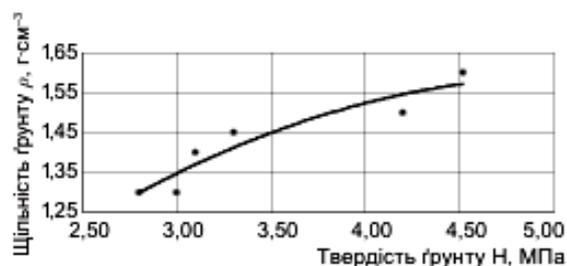


Рис. 1. Залежність між щільністю ґрунту ρ та твердістю H згідно з [1]

Fig. 1. Relationship between soil density ρ and hardness H according to [1]

Водночас відомі й дослідження, що констатують лінійний кореляційний зв'язок даних характеристик ґрунту (рис. 2) [19], що загалом збігається із зарубіжними дослідженнями [33; 34].

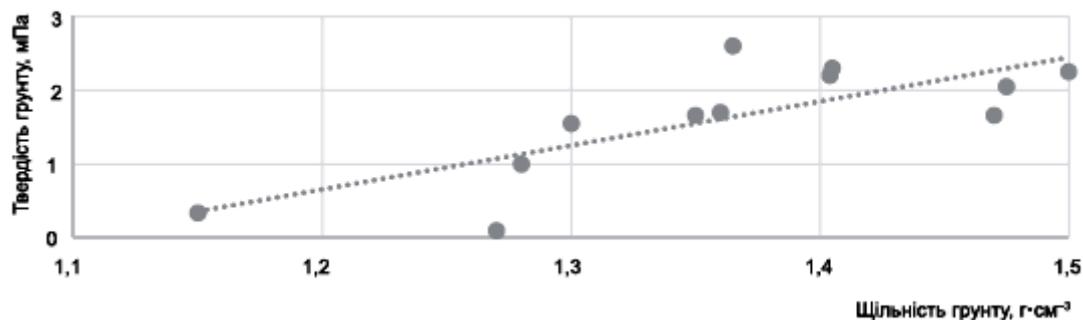


Рис. 2. Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно з [19]

Fig. 2. Relationship between soil density and hardness according to [19]

Однак за щільності ґрунту понад 1,35 г/см³, як свідчать результати ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського», залежність між цими параметрами набуває явно нелінійного характеру (рис. 3) [16].

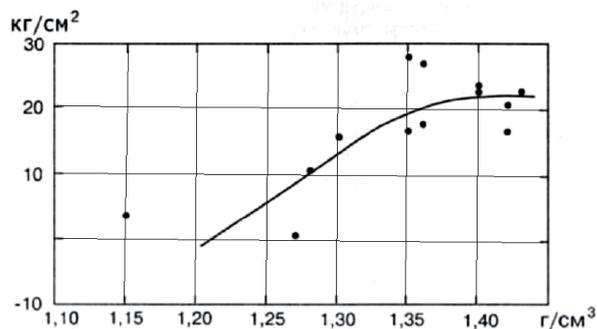


Рис. 3. Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно з [16]

Fig. 3. Relationship between soil density and hardness according to [16]

Другим після щільності за значущістю фактором оцінки допустимого тиску МТА на ґрунт з умов агроекології [7] є вміст вологи (вологість) ґрунту, що нормативно згідно з ДСТУ ISO 10573-2001, ДСТУ ISO 11461-2004, ДСТУ ISO 16586-2005 вимагає доволі тривалої процедури (хоча віднедавна з'явилися і засоби оперативної оцінки, однак ще не включені до нормативної бази [3]). Із механіки ґрунтів логічним є практично лінійний зв'язок між вмістом вологи певного ґрунту і його твердістю, приклад експериментальних замірів чого представлено на рис. 4 [1]. Зрештою, вже опрацьовано й методику дистанційного зондування вмісту вологи з використанням супутникових технологій [29].

Реально значущим чинником агроекологічної оцінки МТА є також площа плями контакту шин,

що у нормативній базі базується на бетонній твердій опорній поверхні (з фіксованим одним значенням поправочного коефіцієнта для всіх типів і станів ґрунту) [6–8], та відчутно відрізняється від реальних значень при деформації ґрунту [23].

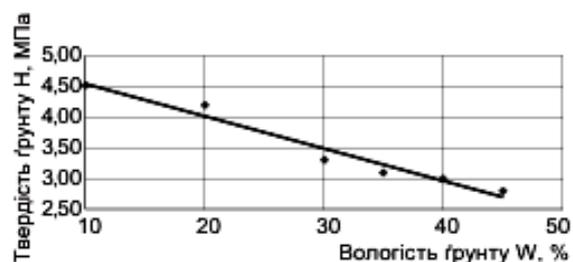


Рис. 4. Залежність твердості та вологості ґрунту згідно з даними [1]

Fig. 3. Dependence of soil hardness and moisture content according to data [1]

Постановка завдання. Оперативна оцінка ущільнення ґрунту МТА на базі використання WES-методики та заміру твердості ґрунту у формі конусного індексу СІ.

Виклад основного матеріалу. Для експериментальної оцінки реальних значень площі плями контакту та ущільнення ґрунту проведено польові дослідження на прикладі одного з найважчих колісних тракторів, який використовують аграрії в Україні – Fendt 1038/1050 Vario [25; 30] та який є найважчим у модельній гаммі (14 т) і обладнаний шинами різних типорозмірів на передній та задній осях (рис. 5, табл. 1). Утім у традиційному для країн ЄС звіті про польові випробування трактора цієї моделі відсутні дані щодо плями контакту та ущільнення ґрунту [31].

Таблиця 1. Базові параметри тракторів Fendt 1038/1050 Vario [30]
Table 1. Basic parameters of Fendt 1038/1050 Vario tractors [30]

Параметри		Значення
Повна маса (без навісного обладнання), кг		14 300
Навантаження на осі: передня/задня, кг		6200/ 8100
Розмірність шин: передні	650/65R34; <u>650/65R38</u> ; 710/65R38	
задні	710/75R42; <u>750/75R46</u> ; 900/65R46	

Примітка: підкреслений типорозмір шин підчас експерименту з Fendt 1038.

Для експериментальної оцінки площі плями контакту шини з ґрунтом (на прикладі дослідного поля університету – темно-сірого легкосуглинкового опідзоленого, підготовленого до сівби [5]) використано товстостінну дерев'яну площадку для з'їзду колеса трактора на цільний ґрунт і фіксації власне контуру контакту, а не сліду – колії проїзду колеса (рис. 5).



Рис. 5. Визначення плями контакту шини задньої осі трактора Fendt 1038 Vario

Fig. 5. Determining the contact patch of the rear axle tire on a Fendt 1038 Vario tractor

Після фіксації контуру плями контакту (із зворотним рухом трактора через дерев'яну площадку) були здійснені й заміри твердості ґрунту на глибину обробітку. Для цього використано доопрацьований із заводом-виробником промисловий пенетрометр «ЛАН-М PRO» [28] і заміною конусних наконечників на конус із регламентованою геометрією згідно з WES-методикою НАТО [4; 35] та відповідними змінами у програмному блоці приладу (рис. 7).

Відчутна різниця у розмірах шин передньої та задньої осей а, відповідно, і заміряних площ контакту з опорною поверхнею ($4937,7 \text{ см}^2$ та

$6476,3 \text{ см}^2$) та різне навантаження зумовили різне ущільнення – зміну твердості ґрунту в центрі плями контакту шин кожної з осей (табл. 2) (триразове дублювання дослідів).

Оцінка щільності ґрунту та вмісту вологи базувалась на звичній лабораторній процедурі із забором проб ґрунту на трьох рівнях глибини – 5, 10–15 та 20 см для трьох місць у доколі 0,4–0,6 м плям контакту та з використанням терез ВЛТК 5000 і сушильної електрошафи з нагрівом проб до 150°C (табл. 2). Забір проб здійснювався для плями заднього колеса і на ділянці поза межами контакту коліс трактора з ґрунтом (так звана контрольна ділянка). Однак загалом цей процес оцінки є тривалим і обмеженим для реального використання в реаліях АПК та достатнього обсягу вибірки з умов статистичної значимості.

Розрахунки кореляції між значеннями твердості і щільності та вмісту вологи ґрунту здійснювались комп'ютеризовано згідно з рекомендаціями проф. Надикто В. Т. [19] у програмному середовищі Microsoft Excell версії 2016. Отримані результати підтверджують (за співвідношенням F-критерію: $F_{\text{факт}} \leq F_{\text{табл}}$) лінійну кореляційну залежність між щільністю ρ та твердістю N ґрунту дослідної ділянки із значенням коефіцієнта кореляції $r = 0,758$ при статистичному рівні значущості 0,05 (опосередковані значення узагальнення шести замірів під колесами трактора та трьох замірів на ділянці поза колією коліс). Лінійна залежність характерна, як вище зазначено, для ґрунтів із щільністю у глибині замірів до $1,35 \text{ г/см}^3$.

Заміри реальних площ контакту шин трактора Fendt 1038 Vario на полі – опорній поверхні, що деформується, дозволяють дати і фактичну оцінку тиску ходової системи у цьому конкретному випадку з умов агроєкології. За відомого статичного навантаження на вісь (табл. 1) отримуємо: 62 кПа для коліс передньої осі та 61,4 кПа для задньої. Відповідно до нормативної бази [7], з урахуванням щільності ґрунту в шарі глибиною 0–10 см та вмісту вологи (табл. 2) це гранично допустимо для літньо-осіннього періоду (але перевищує гранично допустимі значення для весни).



Рис. 6. Фіксація плями контакту заднього колеса трактора і твердості ґрунту

Fig. 6. Fixing the contact patch of the rear wheel of the tractor and soil hardness



Рис. 7. Інтерфейс твердоміра «ЛАН-М PRO» із записом вимірювання

Fig. 7. Interface of the “LAN-M PRO” hardness tester with measurement recording

Таблиця 2. Результати замірів твердості ґрунту СІ та вибірки проб оцінки щільності та вологості (дослідне поле ЛНУП) з Fendt 1038 Vario

Table 2. Results of soil hardness measurements CI and sampling for density and moisture assessment (experimental field of LNEU) with Fendt 1038 Vario

Глибина, см	Значення твердості СІ, кПа / щільності ґрунту, г/см ³ (вологість,%)								
	Заднє колесо			Переднє колесо			Поза колесами		
2,5	765,6	669	722	986	757	801	528	458	537
5	1100/ 1,2(7)	1135/ 1,3(7)	1135/ 1,3(7)	994	906	1047	563/ 1,12(5,1)	519/ 1,04(5,7)	607/ 1,2(4,8)
7,5	1082	1320	1250	1179	1082	1153	590	572	651
10	1135	1373	1390	1276	1223	1267	968	810	906
12,5	1003/ 1,3(9,6)	1294/ 1,5(11)	1320/ 1,6(11)	1373	1302	1382	1126/ 1,4(8,6)	950/ 1,2(9,8)	1091/ 1,3(8,8)
15	10,3	14,1	1223	1390	1390	1443	1047	968	1030
17,5	1214	1769	1646	1575	1505	1566	1179	1241	1197
20	1593/ 1,4(12)	1971/ 1,6(16)	1866/ 1,6(13)	1663	1690	1742	1549/ 1,5(13,9)	1593/ 1,4(14,7)	1540/ 1,4(13,4)
22,5	1716	2033	1927	1936	1830	1901	1584	1566	1681

Кількісна оцінка рівня кореляційного зв'язку, очевидно, залежить і від типу ґрунту. Щодо чорноземів, як найбільш актуальних в Україні (але відсутніх серед дослідних полів нашого університету), був проведений пошук і аналіз досліджень за іншими тематиками, але де були б наведені дані щодо замірів твердості і щільності чорнозему,

бажано й вологості. Звично, що твердість при цьому замірювалась традиційним твердоміром Рев'якіна або, деколи, уже пенетрометром іншої моделі (з дещо іншим наконечником, але малий наконечник останнього досить незначно відрізняється від WES- наконечника, а питання зіставлення власне кількісної оцінки різним інструментарієм

загалом потребує окремого дослідження). Зокрема при нещодавній оцінці гетерогенності агрофізичної якості чорнозему [20] наведені досить цікаві дані щодо всіх трьох параметрів чорнозему для трьох ділянок впродовж 4-х місяців (табл. 3). Щоправда, відсутня інформація стосовно глибини замірів та техніки під час посіву та збору урожаю. Техніка – дві моделі колісних сівалок та заміри поза сівалкою – представлені у дослідженні ефективності прямої сівби на важко суглинковому чорноземі правобережного степу (табл. 4) [27].

Проведені розрахунки кореляційної залежності – оцінки щільності ґрунту від його твердості. Обсяг вибірки даних є незначним, однак для травня (після посіву) та для вересня (після збору урожаю) щільність ґрунту перевищує

1,35 г/см³ і значення отриманого коефіцієнта детермінації $r^2 = 0,22$ для оцінки лінійної кореляції є мінімальним і зумовило проведення розрахунку кореляційного відношення – нелінійного взаємозв'язку твердості і щільності:

$$\rho = 0,621 + 0,052H - 0,029H^2 \quad (3)$$

Зменшення рівня кореляційного взаємозв'язку можна пояснити зміною агрофізичних характеристик ґрунту із квітня по вересень із двома циклами замірів при механічному обробітку та двома циклами без нього (відчутні відповідні перепади щільності та твердості у 1,2–1,5 рази (див. табл. 3)). Відсутність даних щодо використаних МТА не дозволяє дати їхню агроекологічну оцінку, але дозволяє констатувати очевидний взаємозв'язок базових показників ґрунту.

Таблиця 3. Агрофізичні характеристик 3-х ділянок чорнозему згідно з [20]

Table 3. Agrophysical characteristics of three black soil plots according to [20]

Ділянка, параметри		До посіву, квітень	Після посіву, травень	Вегетація, серпень	Після збору, вересень
1	Щільність, г/см ³	1,39	1,61	1,25	1,39
	Твердість, кг/см ²	16,1	10,6	9,5	11,7
	Вологість, %	16,58	16,03	20,10	23,33
2	Щільність, г/см ³	1,14	1,58	1,35	1,50
	Твердість, кг/см ²	11,2	11,7	10,8	14,5
	Вологість, %	21,04	17,24	19,53	23,54
3	Щільність, г/см ³	1,35	1,46	1,34	1,43
	Твердість, кг/см ²	11,1	11,6	10,8	13,5
	Вологість, %	18,01	19,29	20,06	21,50

Таблиця 4. Зміна характеристик важкосуглинкового чорнозему при сівбі сучасною технікою [27]

Table 4. Change in the characteristics of heavy loamy black land soil when sowing using modern technologies [27]

Показник	Шар ґрунту, см	Параметри	Контроль	John Deere 730	Great Plains CPN-1500
Повні сходи	0-10	Твердість, кг/см ²	2,830	2,46	2,420
		Щільність, г/см ³	1,195	1,113	1,10
		Вологість, %	6,74	6	8,8
	10-20	Твердість, кг/см ²	9,22	6,21	7,74
		Щільність, г/см ³	1,265	1,213	1,17
		Вологість, %	10,6	9,9	8,9
	20-30	Твердість, кг/см ²	19,90	13,32	17,21
		Щільність, г/см ³	1,31	1,40	1,31
		Вологість, %	8,9	6,2	9,4
Перед збиранням урожаю	0-10	Твердість, кг/см ²	3,41	3,46	4,80
		Щільність, г/см ³	1,183	1,04	1,035
		Вологість, %	10,2	3,8	12,6
	10-20	Твердість, кг/см ²	11,36	13,08	19,10
		Щільність, г/см ³	1,22	1,17	1,17
		Вологість, %	7,5	6,8	9,8
	20-30	Твердість, кг/см ²	23,35	27,38	32,00
		Щільність, г/см ³	1,187	1,212	1,232
		Вологість, %	8,9	8,4	11,1

Для важкосуглинкового чорнозему представлені дані (табл. 4) [27]. Надані дані характеристик ґрунту щодо двох періодів між механообробітком і зафіксовані значення щільності ґрунту $< 1,35 \text{ г/см}^3$ дозволяють розрахувати власне лінійну кореляцію між твердістю та щільністю для нашого випадку $r = 0,754$. Незначне зниження рівня кореляції порівняно з відомим дослідженням щодо цього ж типу ґрунту пояснюється, мабуть, узагальненням за трьома типами ділянок поля – контрольної та двох із дещо різним механічним обробітком, а також узагальненням за двома періодами часу (повні сходи та перед збиранням урожаю (див. табл. 4). Аналогічно щодо кореляційного зв'язку значень твердості та вологості ґрунту, де вплив пори року та механообробітку ще більш відчутний і з умов забезпечення довірчої ймовірності 95 % обумовлює розмежування рівня кількісної оцінки

взаємозв'язку для різних пор року. (Певним чином це підтверджується й наявною диференціацією норм допустимого максимального тиску рушіїв МТА залежно від пори року та п'яти діапазонів вмісту вологи в ґрунті).

Для цього ж типу ґрунтів цікавими є дані Харківської наукової школи щодо оцінки ефективності трактора ХТЗ-17221 [15], де представлені й результати випробувань щодо оцінки ущільнення ґрунту (табл. 5). Трактор обладнаний шинами однакового типорозміру передньої і задньої осей із майже однаковим навантаженням на осі, що дозволяє за даними цих досліджень оцінити й ефект доущільнення ґрунту при проходженні другої осі по колії передньої, визначення якого за вітчизняною нормативною базою [6] і нормативною базою НАТО – WES – методикою [4; 35] суттєво відрізняються.

Таблиця 5. Зміна твердості і щільності ґрунту у літній період після коліс передньої та задньої осей трактора ХТЗ-17221 [15]

Table 5. Change in soil hardness and density in summer after the front and rear axles of the HTZ-17221 tractor [15]

Глибина, см	Контрольна ділянка		Щільність за мостами, г/см^3		Твердість за мостами, МПа	
	щільність, г/см^3	твердість, МПа	Передній	Задній	Передній	Задній
0-10	1,04	0,76	1,20	1,24	1,50	1,70
10-20	1,16	1,26	1,28	1,30	1,95	2,15
20-30	1,24	1,54	1,32	1,36	2,20	2,44
30-40	1,28	1,80	1,36	1,39	2,48	2,61
40-50	1,31	2,05	1,39	1,41	2,74	2,76

З аналізу даних табл. 2 і 5 випливає насамперед доцільність використання для кількісної оцінки кореляційного зв'язку між вищезгаданими параметрами ділянок, що ще піддавались впливу МТА і ущільненню та механічному впливу (контрольна ділянка). З умов реального поширення так званих «груш деформації» від коліс на глибину понад 30 см очевидна доцільність глибини заміру до 50 см, що дозволить при різкому зростанні значень зафіксувати наявність «підорної підшви» та вжити заходи проти деградації ґрунту [22]. Заміри по колії трактора дозволяють оцінити уже наслідки машинного обробітку землі.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють констатувати значну кореляцію між значеннями твердості ґрунту (як конусного індексу CI) та його щільності й вологості (у межах діапазону значень, характерних для аграрних операцій обробітку). Звично, що чисельні значення коефіцієнтів кореляції для різних типів ґрунтів (чорнозем, суглинок, супісок)

відрізняються. Однак у всіх випадках кореляція вищезазначених параметрів є сильною, що дозволяє оперативну агроекологічну оцінку МТА для конкретного поля із заміром значень твердості сучасними пенетрометрами із стандартизованим конусним наконечником (CI) під вимоги WES-методики. Очевидна, відповідно, актуальність прийняття в Україні як ДСТУ міжнародного стандарту ISO 22476-1:2012 та подальшого розвитку вітчизняної нормативної бази – ДСТУ 4428:2005, ДСТУ 4521:2006 та ДСТУ 4977:2008, що дозволило б проводити агроекологічну оцінку МТА в конкретних умовах в режимі реального часу. При цьому слід врахувати реалії різних типорозмірів коліс передньої та задньої осей і ефект додаткового ущільнення ґрунту колесами задньої осі при послідовному проходженні в одній колії. Потребує розвитку і нормативна оцінка площі плями контакту шин, що реально більша на ґрунтах порівняно з передбаченою ДСТУ оцінкою – заміром на твердій, бетонній поверхні, а також відповідною корекцією її значення залежно від

навантаження на колесо, тиску повітря в шині та типу шин (діагональні, радіальні і т.п.).

Бібліографічний список

- Адамчук В. В., Булгаков В. М., Кувачов В. П., Головач І. В., Ігнат'єв Є. І., Черниш О. М. Дослідження властивостей постійної технологічної колії, яку використовують при мостовому землеробстві. *Вісник аграрної науки* 2020, № 8 (809). С. 63–68. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-08>.
- Боднарчук А. С. Підвищення ефективності використання колісного трактора тягового класу 3,0 на польових роботах з різними типами шин. Магістерська робота. Дубляни: Львівський НАУ. 2021. 84 с.
- Вологомір ґрунту, піску, торфу МГ-44 (MG44). URL: <https://shop.gpsgeometer.com/ua/products/vologomir-gruntu-pisku-torfu-mg-44> (дата звернення: 10.02.2025).
- Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
- Ґрунти Львівської області: колективна монографія / за ред. С. П. Позняка. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2019. 424 с.
- ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2005. 10 с.
- ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2006. 8 с.
- ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 10 с.
- ДСТУ 4745:2007. Якість ґрунту. Визначення щільності твердої фази пікнометричним методом. Київ: Держспоживстандарт, 2007. 12 с.
- ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 8 с.
- Жуков О. В., Задорожна Г. О., Коцун В. І., Мізін М. С. Дерново-алювіальні ґрунти у заплаві р. Дніпро в межах природного заповідника «Дніпровсько-Орільський»: морфологія та профільний розподіл фізичних властивостей. *Вісник Дніпропетровського аграрно-економічного університету*. 2016. № 4 (42). С. 44–55.
- Іванишин В. В., Рудь А. В., Мошенко І. О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. Вип. 27. С. 146–158.
- Качинский Н. А. Физика почвы. Ч. 2. Москва: Высшая школа, 1970. 360 с.
- Кушнарев А. С., Кравчук В. И., Кушнарев С. А., Дюжаев В. П. Мониторинг плотности почвы пахотного горизонта в системе точного (управляемого) земледелия. *Техніка і технології АПК*. 2010. № 9 (12). С. 12–16.
- Лебедев С., Коробко А., Лебедев А., Шуляк М. Технологічна адаптація тракторів загального призначення до природних умов ґрунтообробки. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технології для сільського господарства України*. 2023, т. 2, № 33 (47). С. 57–67. [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-5](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-5).
- Медведев В. В., Лындина Т. Е., Лактионова Т. Н. Плотность сложения почв. Харьков: 13 типография, 2004. 243 с.
- Медведев В. В. Твердость ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку (Soil hardness as a criterion for justifying technologies and technical means for its cultivation). *Вісник аграрної науки*. 2010. № 4. С. 14-18.
- Медведев В. В. Твердость почв. Харьков: КП «Городская типография», 2009. 152 с.
- Надикто В. Т. Обґрунтування методу апроксимації експериментальних даних. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 9 (858). С. 38–44. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202409-05>
- Погромська Я. А. Динаміка гетерогенності агрофізичної якості чорнозему звичайного у межах сільськогосподарського поля. *Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник*. 2023. Вип. 94. Харьков: ННЦ «ІА ім. О. Н. Соколовсько». С. 39–53.
- Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. 2018. № 27. С. 110–116.
- Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. № 28. С. 209–216.
- Сивулька П., Сукач О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 1 (24), ЛНТУ, Луцьк, С. 399–408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>
- Сиромятников Ю. М. Вплив способів прямої сівби на ріст, розвиток і урожайність зерна ячменю ярого в умовах північно-східної частини України. *Зернові культури*. 2020. Том 4, № 2. С. 296–304. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0138>.
- Трактор Fendt 1000 генерація 3. URL: https://dam.agcocorp.com/content/dam/multisite/fendt/marketing/multi-region/documents/marketing-material/brochures/tractors/1000-vario-gen3/uk/Fendt1000VarioGen3_UK_web.pdf (дата звернення: 10.02.2025).
- Цизь, І. Є., Голій, В. О. Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «Еліта». *Сільськогосподарські машини*. 2024. № 50. С. 25–36. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.133>.
- Черячукін М. І., Григор'єва О. М. Ефективність прямої сівби на чорноземі звичайному важко-суглинковому правобережного степу. *Вісник аграрної*

науки. 2019. № 10 (799). С. 5–11. <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201910-0>.

28. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 10.02.2025).

29. EOSDA Grop Monitoring. URL: <https://eos.com/uk/blog/volohist-gruntu> (дата звернення: 10.02.2025).

30. Fendt 1000 Vario. URL: <https://www.fendt.com/de/geneva-assets/article/26673/228925-fendt1000vario-1902-td-de.pdf> (дата звернення: 10.02.2025).

31. FENDT 1046 VARIO. DLG-анерkannt: "powermix" Leistung und Kraft-stoffverbrauch im Feld- und Transporteinsatz. DLG – Pruefbericht 7533. URL: <https://www.dlg-testservice.com/de/agrartechnik-betriebsmittel/fahrzeugtechnik-traktoren>. (дата звернення: 10.02.2025).

32. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

33. Kumar A., Chen Y., Sadek M. A. A. et al. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Research in Agricultural Engineering: CIGR J.* 2012. V. 14, Is. 1. P. 26–37.

34. Sayedahmed A. Modeling and Correlation of Soil Cone Index for Bulk Density, Moisture Content and Penetration Depth Levels in a Sandy Loam Soil. *J. of Soil Sciences and Agricultural Engineering.* 2015. V. 6, Is. 2. P. 259–273.

35. Wong Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London, 2010. 482 p.

Стаття надійшла 12.02.2025

ГІБРИДНИЙ ПРИВІД ВАНТАЖОПАСАЖИРСЬКОГО АВТОМОБІЛЯ «МАМАЙ-2» ДЛЯ БЕЗДОРІЖЖЯ

Андрій Кіхтан¹, Дмитро Налесник²

¹*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,*

²*Національний університет «Львівська політехніка»*

м. Львів, Україна

e-mail: kwest@ukr.net; e-mail: dmytro.nalesnyk@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.57-63>

Кіхтан А., Налесник Д. Гібридний привід вантажопасажи́рського автомобіля «Мамай-2» для бездоріжжя

Проаналізовано конструкції гібридного приводу автотехніки для бездоріжжя, насамперед військової, що віднедавна почала з'являтися у передових арміях НАТО. Узагальнено умови використання дизельних автомобілів – багті «Мамай» у військових операціях спільно із фахівцями ВАТ «Укравтобуспром». На основі цього опрацьовано схему приводу та необхідні параметри і характеристики щодо категорій M1/N1 класу SG із забудою типу AF згідно з Директивою ЄС № 2018/858. Докорінною відмінністю від серійних гібридних легкових автомобілів та повнопривідних кросоверів є зміна схеми приводу – перехід на послідовну (seriell) та збільшення на порядок ємності батареї з умов забезпечення значного запасу ходу бездоріжжям на електротязі при відключеному дизель-генераторі. Враховуючи різноманітність бездоріжжя, розглянуто питання диференційованої оцінки запасу ходу залежно від умов руху. Оцінено розрахунок необхідної ємності батареї та потужності дизель-генератора. Розглянуто питання додаткового захисту батареї та електроприводу в умовах боліт і водних перешкод, а також загальні питання компоновання автомобіля для бездоріжжя, у тому числі підвіски, як визначальної умови мобільності (швидкісних режимів) руху – обмеження граничним рівнем віброприскорень, формування передавального діапазону трансмісії та підбору відповідного типорозміру шин.

На базі розвитку дизельного багті «Мамай» опрацьовано агрегатну комплектацію під експлуатаційну масу до 2 т та оцінено потенційний запас ходу, зокрема варіант використання агрегатної бази поширених Nissan Leaf та Toyota Prius в умовах війни і, відповідно, обмеженого терміну експлуатації.

Ключові слова: автомобіль, гібридний привід, бездоріжжя, запас ходу, схеми трансмісій, ємність батареї.

Kikhtan A., Nalesnyk D. Hybrid drive of the "Mamai-2" cargo-passenger off-road vehicle

Based on the conducted review and analysis of hybrid drive system designs for off-road vehicles, primarily military ones, which have recently begun to appear in the advanced NATO armies, and on the generalization of operating conditions for diesel vehicles such as the Mamai buggy used in military operations, a drivetrain layout and the required parameters and characteristics have been developed in cooperation with specialists from PJSC "UkrAvtoBusProm." These developments correspond to categories M1/N1 of class SG with AF-type bodywork in accordance with EU Directive No. 2018/858.

The fundamental difference from mass-produced hybrid passenger cars and all-wheel-drive crossovers lies in the modification of the drivetrain configuration - transitioning to a series (serial) hybrid scheme - and a tenfold increase in battery capacity to ensure a substantial all-electric range in off-road conditions with the diesel generator disengaged. Considering the diversity of off-road terrains, the issue of differentiated range assessment depending on driving conditions has been examined, along with the subsequent calculation of the required battery capacity and diesel generator power.

Special attention has been given to the additional protection of the battery and electric drive components under conditions involving swamps and water obstacles. General aspects of vehicle layout for off-road applications have also been analyzed, including the suspension system as a key determinant of mobility (speed regimes) constrained by maximum permissible vibration accelerations, the formation of the transmission gear ratio range, and the selection of appropriate tire sizes.

Building on the development of the diesel-powered Mamai buggy, an aggregate configuration has been elaborated for an operational mass of up to 2 tonnes, along with an evaluation of the potential driving range, including the possibility of using components from widely available Nissan Leaf and Toyota Prius vehicles (considering wartime conditions and the correspondingly limited service life).

Keywords: vehicle, hybrid drive, off-road, driving range, transmission layouts, battery capacity.

Постановка проблеми. Застосування гібридного приводу на автомобілях для бездоріжжя (передусім військових, на базі яких і аграрні модифікації та машини для надзвичайних ситуацій

тощо) починається фактично впродовж останніх трьох-шести років, із запізненням майже на 20–25 років порівняно з автомобілями загального призначення [9; 14; 26]. Це обумовлено не тільки

значно складнішими умовами використання, а й зміною цільового пріоритету використання гібридного приводу – зменшення на порядок імовірності локації руху машин у інфрачервоному та звуковому спектрах частот, а також використання дизель-генераторів приводу для енергозабезпечення інших споживачів в умовах війни та проблем із стаціонарними лініями електропередач. Останнє обмежує і використання конструктивно простішого й дешевшого суто батарейного електроприводу, що вже використовуються на фронті на дистанційно керованих невеликих автомобілях повною масою в межах 0,3–1 т, так званих наземних роботизованих комплексів (НРК), десятків моделей яких віднедавна на волонтерських ініціативах з'явилися і в ЗСУ [12]. Обмежені вантажність, швидкість руху в межах 10–20 км/год та запас ходу 10–20 км звично не можуть перекрити потребу в більшій автотехніці, щорічні втрати якої на війні сягають до двох десятків тисяч одиниць. Водночас власне електропривід найзручніший для дистанційного управління машиною без водія (UGV – unmaned ground vehicle за класифікацією НАТО). Усе це й зумовило замовлення з боку МОУ на 2026 рік першої промислово-дослідної партії баггі – як UGV дистанційного, так і ручного, безпосередньо водієм, керування [13]. Очевидна актуальність і вітчизняних відповідних машин, враховуючи їхню необхідну кількість та вартість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із зрозумілих причин публікацій щодо власне проектування військової автотехніки (ВАТ) у відкритому доступі практично немає. З аналізу доступної інформації на сайтах основних виробників (Polaris, Oshkosh, Rheinmetall Defency, Arquus тощо) та відкритих патентних відомств очевидно,

що домінуючою схемою гібридного приводу ВАТ є власне послідовна (seriell), на відміну від гібридних автомобілів і кросоверів категорії М1, де домінує схема паралельного приводу [8]. Це підтверджується і прем'єрою у 2024 році власне вищезгаданого сімейства машин Ermelin (Hermelin – горностай у ФРН) (рис. 1) [19], і результатами роботи Державної агенції США з розвитку озброєння, де з 2011 року розпочалися роботи з військової автотехніки з гібридним приводом практично в усіх найбільш розповсюджених у парках ВАТ вагових категоріях – від 1,5 до 12 т (рис. 2) [21]. Упродовж останніх двох–трьох років у процесі переходу армії США на автотехніку нового покоління перші партії автотехніки з гібридним приводом надійшли на озброєння. Лідером у цьому плані, однак, є армія Ізраїлю, де ще з 2016 року з'явилися роботизовані легкоброньовані бойові баггі Guardium (рис. 3) [22].

Зрештою, і у США на базі баггі з гібридним приводом уже проходять випробування бойової роботизованої машини [2]. Актуальність гібридного приводу для легких тактичних автомобілів – військових баггі – підтверджена відповідною розробкою і в Литві (рис. 3) [3] – країні, де не було власного автопрому, але яка має спільний кордон із рф. Слід зазначити, що і у рф два роки тому військово-промисловий концерн «Калашніков» (найбільший виробник стрілецької зброї та з наявними авто виробництва – ИЖ «Москвич») представив дослідний зразок військового баггі з гібридним приводом [17], що має реальні шанси на промислове виробництво (окрім трьох уже наявних промислових виробництв баггі на агрегатній базі ВА3-2121 «Нива»). Нещодавно з'явилась інформація щодо випробування роботизованого баггі з гібридним приводом вантажністю 250 кг (у тому числі на війні) [4].



Рис. 1. Промислово-дослідні зразки баггі Ermelin з гібридним приводом [19]
Fig. 1. Experimental and industrial prototypes of Ermelin buggies with a hybrid drive [19]



(b) Raytheon Hy-DRA



(a) XM1124

Рис. 2. Дослідні зразки легкої військової автотехніки з гібридним приводом США [21]
Fig. 2. Experimental prototypes of U.S. light military vehicles with hybrid powertrains [21]



Рис. 3. Роботизоване бойове баггі Guardium [22] та баггі з гібридним приводом Krampus [3]
Fig. 3. Guardium robotic combat buggy [22] and Krampus buggy with a hybrid powertrain [3]

Постановка завдання. Наше завдання – визначення необхідних характеристик та параметрів базових агрегатів гібридного приводу баггі, як розвитку проекту «Мамай» з умов тричотириразового збільшення швидкості та дальності руху на електротязі, зокрема необхідного передавального діапазону приводу з умов досягнення швидкості руху 100–120 км/год при виході тягового електродвигуна на максимальну потужність, а також корисного навантаження (вантажності) порівняно з наявними у ЗС України НРК [12].

Виклад основного матеріалу. Відомі методики розрахунку необхідних параметрів та характеристик гібридного приводу прив'язані до автомобілів загального призначення і, відповідно, до домінуючої там схеми паралельного приводу, де тяговий електродвигун і батарея відіграють тільки допоміжну роль щодо тягового бензинового або дизельного двигуна [7; 15; 20; 27]. Послідовна схема приводу (seriell), що домінує у вищезгаданих

зразках військової автотехніки (табл. 1), обумовлює і інший підхід до визначення необхідних характеристик базових агрегатів [10; 11]. Основні засади щодо формування базових характеристик підтверджують і нечисленні зарубіжні публікації щодо послідовної схеми [18; 23; 24], однак вимагають певної корекції в реаліях сучасної війни з рф. Зокрема:

- значно зросли вимоги щодо мобільності руху бездоріжжям (відповідно, й параметрів приводу та підвіски і стійкості руху) – до 70–80 км/год при збереженні умови забезпечення максимальної швидкості на асфальтобетоні більше ніж 100–110 км/год (з урахуванням швидкісних обмежень для наявних типорозмірів шин із всюдихідним протектором);

- збільшення запасу ходу до 40 км бездоріжжям на батарейній електротязі при вимкненому дизель-генераторі – з умов локації руху ВАТ у інфрачервоному (тепловізори) та звуковому спектрах частот.

Таблиця 1. Базові параметри легких військових автомобілів/баггі з гібридним приводом [2; 19; 21]
Table 1. Basic parameters of light military vehicles/buggies with hybrid powertrains [2; 19; 21]

Модель	Рік	Схема при-воду	Маса, кг повна / вантажність	Двигуни, кВт		Батарея кВт/год	Запас ходу, км	Макс. швидк. км/год	Розгін до 80 км/год, с
				тягов./генер.	двз				
HMMWV XM1124	2004	Seriell	4130 / 770	100/30	100	24	-	128	7
CERV	2011	Seriell	2945 / 1350	100/50	1,4L	22	19,5	128	-
Ermine UGV	2024	Seriell	1375 / 500	2x30	F34	16	-	90	-
Ermine 6x6	2024	Seriell	2300 / 1000	3x30 /	F34	32	-	90	-
Polari Kinetic	2019	Seriell	/567	70/		14,9	72	90	

Відповідно, визначальною умовою формування необхідної потужності тягового електродвигуна (впродовж понад 15–20 хв стабільного теплового режиму) є власне забезпечення швидкості руху типовим бездоріжжям при повній масі автомобіля, рух при швидкостях 100–120 км/год на асфальтобетоні є менш енергозатратним. Питання власне у визначенні «типового бездоріжжя», при всьому його розмаїтті й характерних особливостях для різних країн [6; 27]. Для України типовим можна вважати чорнозем (в усіх його різновидах і станах), що займає понад $\frac{2}{3}$ площ потенційних бойових дій (і, на жаль, реальних). Останній практично відсутній на територіях країн НАТО і недостатньо вивчений у террамеханіці [27]. Характерною особливістю чорнозему є підвищена липучість у вологому стані, що зумовлює окремі вимоги щодо висоти протектора та ненадмірного насичення ним бігової доріжки шин (на кшталт звичних ведучих вітчизняних шин колісних тракторів, хоча вони обмежені швидкісними режимами до 40–50 км/год). Очевидно, що для чорнозему, зрештою просто для глинистих і

суглинкових ґрунтів, в абсолютно розмоклому стані на глибину понад 30 см реалізація необхідного тягового зусилля для забезпечення швидкості 80 км/год малоімовірна через відповідне падіння сили зчеплення шин із опорною поверхнею. Значно триваліші періоди характерні для помірного зволоження ґрунту із вмістом вологи у діапазоні 30–40 % вологості, що є пороговим із умов запасу тяги із зчеплення для досягнення 80 км/год для більшості типажу ВАТ. Звичним (і нормативним у НАТО) показником стану ґрунту, як опорної поверхні, є показник твердості – так званий конусний індекс CI (cone index) у діапазоні 380–420 кПа для такого випадку [6; 10].

З урахуванням досвіду проектних робіт та експериментальних досліджень тактичного баггі «Мамай» із дизельним двигуном VW потужністю 110 к.с. спільно з ВАТ «Укравтобуспром» опрацьовано концепцію розвитку його конструкції під гібридний привід та зміни з урахуванням збільшення спорядженої маси та забудови нової агрегатної, передусім акумуляторної батареї (рис. 4) [11].

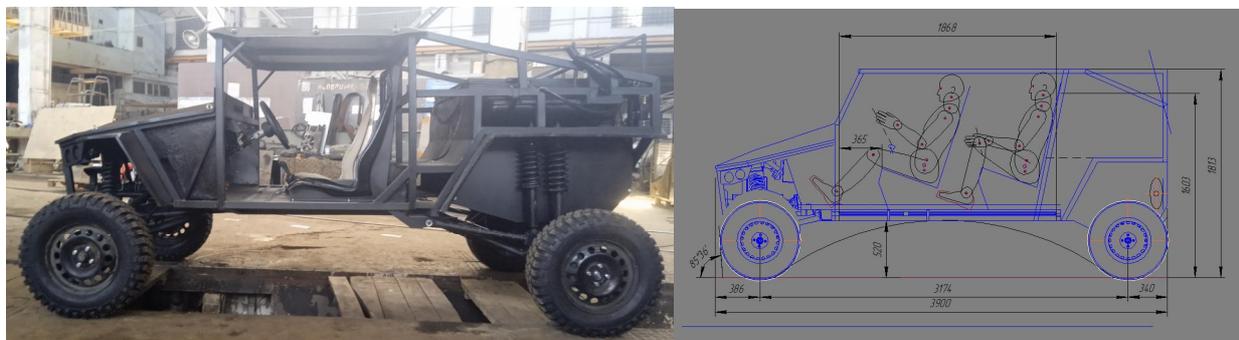


Рис. 4. Дизельне базове баггі «Мамай» та зміни «Мамай-2» з гібридним приводом
Fig. 4. Diesel baseline “Mamai” buggy and “Mamai-2” modifications with hybrid powertrain

Для проведення розрахунків методами імітаційного моделювання у програмному середовищі MATLAB Simulink [10], насамперед з умов енергозатратності руху і запасу ходу, важлива оцінка к.к.д. елементів силового електричного приводу, що відрізняється від звичного дизельного. З аналізу відомих досліджень [1; 5; 16] випливає, що ефективний к.к.д. тягового електродвигуна на реальних режимах роботи під час руху є в діапазоні 0,78–0,92, з умов оцінки запасу ходу орієнтуємось на 0,87. К.к.д. перетворення постійного струму з батареї у змінний для двигуна орієнтовно 0,985, к.к.д. головної конічної передачі – близько 0,99. Окрім того, у процесі руху витрати електроенергії на світлотехніку (в темну пору доби), електропривід гальм та електропідсилювач кермового механізму, що загалом вимагає окремого дослідження в реальній експлуатації та опосередковано можна прийняти в обсязі від 0,07 до 0,4 кВт.год – за наявності електропідсилювача керма та використання світлотехніки.

Формування передавального діапазону трансмісії (тут головної передачі, для певних категорій ВАТ і понижувальної передачі роздавальної коробки) визначається з умови потрапляння в зону так званого перелому тягового електродвигуна – досягнення і стабілізації номінальної потужності та початку пропорційного падіння крутного моменту. З урахуванням радіуса кочення попередньо підбраного типорозміру шин для бездоріжжя (з умов кліренсу, вантажності та допустимої швидкості руху) для заданої швидкості (аеродинамічний опір рухові) та сумарного опору коченню шин і деформації ґрунту (за відомого значення твердості СІ) можна визначити нижню межу необхідної потужності – крутного моменту тягового електродвигуна [10].

Попередня оцінка – визначення передавального відношення головної передачі u_0 з умови потрапляння в зону частоти обертання n_k за так званого перелому тягової характеристики регламентованої швидкості руху $V = 80$ км/год бездоріжжям із відомим опором руху:

$$u_0 = 0,377 n_k r_k / V \quad (1)$$

з наступною перевіркою – корекцією отриманого значення u_0 з умов забезпечення тягового зусилля F_k ведучих коліс переборення сил сумарного опору усталеного руху при 80км/год та оцінкою реалізації тяги з умов зчеплення шин з опорною поверхнею:

$$F_k \leq \mu G_k \quad (2)$$

$$M_e \geq (\psi G_a + k F V^2 / 13) r_k / u_0 \eta \quad (3)$$

при $F_k = M_e u_0 \eta / r_k \quad (4)$

де V – швидкість руху, тут 80 км/год; M_e – крутний момент електродвигуна в зоні n_k ; G_k , G_a – зчіпна маса на ведучих колесах та повна маса автомобіля; ψ – коефіцієнт сумарного опору коченню коліс, включно опір деформації ґрунту; kF – коефіцієнт аеродинамічного опору кузова автомобіля та площа поперечного перерізу; r_k – радіус ведучих коліс (з урахуванням радіальної деформації через навантаження на вісь; η – к.к.д. трансмісії.

Звично, що, окрім варіабельності значення u_0 , корегуванню підлягає і типорозмір ведучих шин – r_k .

Забезпечення максимальної швидкості 110–120 км/год на асфальтобетоні при виконанні вищевикладеної умови руху 80 км/год легкорозмоклим бездоріжжям, як показали результати імітаційного моделювання руху програмному середовищі MATLAB Simulink, є безпроблемним унаслідок відчутно меншого опору рухові та значному швидкісному діапазону роботи сучасних електродвигунів змінного струму електромобілів у зоні поза n_k за практично максимальної потужності.

Враховуючи реалії воєнних дій і домінування ударних дронів у зоні руху ВАТ переднього краю та відповідні втрати автотехніки до 15–20 тис. шт. річно, відповідно невеликі терміни служби та величини пробігів, обмежені кошти, здебільшого волонтерські, на поповнення автопарку, на першому етапі опрацьовано варіант агрегатної комплектації баггі «Мамай-2» (рис. 4) гібридним приводом із використанням тягового електроприводу Nissan Leaf 1-ї генерації та, враховуючи значні запаси зберігання пошкоджених у ДТП патрульних Toyota Prius III генерації у МВС України, і реальний варіант переробки приводу Prius III на схему seriell [9]. Звично в обидвох варіантах передбачено використання відносно дешевої вживаної літій-іонної батареї Leaf із залишковою ємністю 18–20 кВт.год, що дозволяє забезпечити, як показують результати комп'ютерного моделювання руху на зволоженому бездоріжжі при швидкостях 40–50 км/год, запас ходу на електротязі (при вимкненому дизель-генераторі) близько 40 км [5; 25]. Звично, що логічне бажання збереження заводського виконання – упаковки батареї. Окрім цього, додатковий захист під специфіку використання у військових діях та вага 292 кг, зумовили необхідність збільшення колісної бази (див. рис. 4), що у свою чергу дозволяє варіант із повноцінною компоновкою – забудовою двох рядів пасажирських сидінь та можливістю трансформації у значно збільшене вантажне відділення.

Питання зарядки батареї у польових умовах і проблемності доступу до стаціонарних ліній електромереж є очевидними. До комплектації сучасних електромобілів входять зарядні пристрої від побутової електромережі 220–230 В із випрямлячем зарядки батареї постійним струмом потужністю 4–7 кВт, що обумовлює реалію доукомплектування баггі (на агрегатній базі Leaf) звичним дизель- або бензогенератором відповідної потужності.

Розробка і промислова реалізація гібридного приводу схеми seriell створює основу для подальшого розвитку конструкції в плані дистанційного управління – НРК.

Висновки. Реалізація гібридного приводу легкого ударного автомобіля переднього краю – військового баггі дозволяє не тільки на порядок знизити ймовірність локації руху противником в інфрачервоному та звуковому спектрах частот, але створює базу для реалізації і безпечної дистанційного управління – наземного роботизованого комплексу (НРК). Значно більші швидкості – до 80–100 км/год, та дистанції автономного руху – до 40 км, а також корисне навантаження – до 700 кг (на прикладі проекту «Мамай-2») порівняно до наявних уже НРК, дозволяють і розширити сферу використання цього класу НРК – від транспортно-логістичних до бойових із різними типами озброєння. Звично, що найбільшою проблемою в умовах інтенсивного використання засобів радіоелектронної боротьби є надійність і ефективність засобів зв'язку – дистанційного управління НРК.

Бібліографічний список

1. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Гнатов А. В., Колесніков В. А. Гібридні автомобілі. Харків: ХНАДУ, 2008. 327 с.
2. Бойові роботи – баггі Racer проходять випробування: навіщо вони військовим та чим допоможуть. URL: <https://focus.ua/uk/digital/561397-bojovi-roboti-baggi-racer-prohodyat-viprobuvannya-navisho-voni-vijskovi-ta-chim-dopomozhut> (дата звернення: 15.02.2025)
3. В Литве представили гибридный багги Krampus с запасом хода 1000км / 08.09.2021. URL: <http://focus.ua>492315-v-litve-predstavili>... (дата звернення: 15.02.2025)
4. Військові роботи «Депеша» і «Баггі»: в РФ знайшли засоби для боротьби з зубами дракона URL: <https://focus.ua/voennye-novosti/649892-novye-roboty-depesha-i-baggi-v-rf-nashli-sredstvo-dlya-borby-s-zubami-drakona> (дата звернення: 15.02.2025)
5. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. Київ, 2020, № 2. С. 21–28.
6. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
7. Кайдалов Р. О. Наукові основи створення автомобілів з комбінованою енергетичною установкою: дис... д-р техн. наук: 05.22.02. Харків, 2018. 394 с.
8. Кіхтан А. Аналіз існуючих конструкцій та формування схеми гібридного приводу колісної автотехніки високої прохідності. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. № 28. С. 63–71.
9. Крайник Л. В., Кіхтан А. В., Кохан В. Ф., Волощук М. Я. Концептуальні основи формування гібридного привода автомобіля високої прохідності. *Військово-технічний збірник*. 2022. № 27. С. 10–17.
10. Крайник Л., Кіхтан А., Габріель Ю. Методичні засади визначення базових параметрів гібридного приводу автомобіля високої прохідності. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 27–34.
11. Крайник Т., Кіхтан А. Гібридний привід і структура шасі легкої ударної військової автотехніки. *Тези ІІ ВУНТК*, 20-22.06. 2024р., НТУ, Київ, 2024. С. 73–74.
12. Список бойових наземних платформ України. URL: <https://uk.wikipedia.org> (дата звернення: 15.02.2025)
13. Україна першою у світі отримає багі «Ерміне» від компанії Райнметал. URL: <https://military.com/uk/news/ukrayina-pershoyu-u-sviti-otrymae-bagi-ermine-vid-kompaniyi-rheinmetall/> (дата звернення: 15.02.2025)
14. Army hybrid vehicles power forward. 21 July 2021. URL: <https://www.army.mod.uk/news/2021/077-army-hybrid-vehicles-power-forward> (дата звернення: 15.02.2025).
15. Chris Mr., Abul Masrur, David W. Goo Hybridfahrzeuge.Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven fuer die Praxis /Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2014 512 s.
16. Chris Randall. Kalashnikow returns to russias roads. URL: <https://www.electrive.com/2018/08/26/kalashnikow-returns-to-russias-roads/> (дата звернення: 15.02.2025).
17. Dong Hwan Choi, Seong Jun Lee,Bo-Hyung Cho, Yeo Giel Yoon. Development of DesignTool for Hybrid Power Systems of Hybrid Electric Military Combat Vehicles. URL: <https://www.iri.upc.edu>VPPC10>uploads>PDF>paper>95-69838-final> (дата звернення: 15.02.2025).
18. Ermine (Hermelin) – Modular hybrid vehicle family. URL: <https://www.rheinmetall.com/en/products/tactical-wheeled-vehicles/tactical-wheeled-vehicles/ermine-hermelin> (дата звернення: 15.02.2025)

19. Fan B. S.-M. Multidisciplinary Optimization of Hybrid Electric Vehicles: Component Sizing and Power Management Logic / Dissertation, University of Waterloo, Canada, 2011. 172 p.
20. Giesbrecht J. Feasibility of Hybrid Diesel-Electric Powertrains for Light Tactical vehicles / Defence Research and Development Canada DRDC-2018-D049, June 2018. 21 p. URL: <http://cradpdf.drdc-rddc.ca/unc319/> (дата звернення: 15.02.2025)
21. Guardium. URL: <https://www.en.wikipedia.org> (дата звернення: 15.02.2025).
22. Krause M. Hybridantriebe fuer Militaer-Fahrzeuge. 29.05.2022. URL: <https://aetrans.de/hybridantiebe-fuer-militaerfahrzeuge> (дата звернення: 15.02.2025).
23. Liu Z., Marmun A.-M., Rizzo D., Onori S. Combined Battery Design Optimization and Energy Management of a Series Hybrid Military Truck. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Journals/32.pdf> (дата звернення: 15.02.2025).
24. Miller T., Riozeni G., Li Q. Simulation – Based Hybrid Electric Vehicle Design Search. <https://doi.org/10.4271/1999-01-1150>
25. Mittal V., Novoselich B., Rodriguez A. Hybridization of US Army Combat Vehicles. SAE Technical Paper 2022-01-0371. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0371>.
26. Vezzini Andrea. Optimierung des elektrischen Antriebssystem für ein Hybrid Fahrzeug. Dissert. ETH Zuerich, 1997. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001772860>
27. Wong Y.J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. / Butterworth. London. 2010. 482 p.

Стаття надійшла 18.02.2025

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗДІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ НА ПОКАЗНИКИ ОПОРНОЇ ПРОХІДНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Віталій Хома, аспірант

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: homa.v@hotmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.64-69>

Хома В. Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки

У статті розглянуто проблему підвищення прохідності колісних автомобілів підвищеної прохідності в умовах руху по неоднорідних опорних поверхнях із різним рівнем опору коченню та зчеплення. Показано, що ключовим регульованим фактором, який визначає ефективність взаємодії шини з ґрунтом, є тиск повітря в шинах, оскільки він безпосередньо впливає на радіальну деформацію, площу плями контакту, глибину колії, втрати енергії та максимальну швидкість руху. Обґрунтовано, що використання систем централізованого регулювання тиску не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал прохідності через різні умови роботи коліс передніх і задніх осей, які рухаються по ґрунту з різним ступенем ущільнення. Метою дослідження є експериментальне визначення швидкісних показників руху повнопривідного автомобіля УАЗ-469 при різних значеннях тиску повітря в шинах та оцінка адекватності математичної моделі руху, розробленої в середовищі MATLAB Simulink, для умов бездоріжжя. Експериментальні дослідження проведено на ділянці природного піщаного бездоріжжя з попередньою оцінкою фізико-механічних характеристик опорної поверхні за методикою визначення конусного індексу СІ відповідно до стандартів WES та MMP. У ході випробувань виконано вимірювання конусного індексу ґрунту, тиску повітря в шинах, радіальної деформації шин, максимальної швидкості руху та пройденого шляху з використанням синхронізованого вимірювального комплексу. Отримані результати показали, що роздільне регулювання тиску повітря в шинах забезпечує зростання максимальної швидкості руху бездоріжжям на 15–20 % порівняно з централізованим регулюванням, а також підвищення показників прохідності за методиками WES та MMP. Результати дослідження підтверджують доцільність індивідуального підбору тиску в шинах для кожної осі як ефективного засобу підвищення прохідності колісних транспортних засобів.

Ключові слова: прохідність автомобіля, бездоріжжя, тиск повітря в шинах, роздільне регулювання тиску, взаємодія шини з ґрунтом, конусний індекс, УАЗ-469, швидкість руху.

Khoma V. Experimental studies of the influence of separate tire pressure regulation on the bearing mobility parameters of automotive vehicles

The article addresses the problem of improving the mobility of off-road wheeled vehicles under operating conditions on non-uniform supporting surfaces characterized by varying rolling resistance and traction levels. It is shown that tire inflation pressure is a key controllable factor determining the efficiency of tire–soil interaction, as it directly affects radial deformation, contact patch area, rut depth, energy losses, and permissible vehicle speed. It is substantiated that the use of centralized tire pressure regulation systems does not allow the full mobility potential to be realized due to different operating conditions of the front and rear axle wheels, which move over soil with varying degrees of compaction.

The study aims to experimentally determine the speed performance of a four-wheel-drive UAZ-469 vehicle at various tire inflation pressures and assess the adequacy of a vehicle motion mathematical model developed in the MATLAB Simulink environment for off-road conditions. Experimental investigations were carried out on a natural sandy off-road test section with a preliminary evaluation of the physical and mechanical properties of the supporting surface using the cone index (CI) determination method in accordance with the WES and MMP standards.

During the tests, measurements of soil cone index, tire inflation pressure, tire radial deformation, maximum vehicle speed, and distance traveled were performed using a synchronized measurement system. The obtained results demonstrated that separate tire pressure regulation provides an increase in the maximum off-road speed by 15–20% compared to centralized regulation, as well as an improvement in mobility indicators according to the WES and MMP methodologies. The research results confirm the feasibility of individual tire pressure selection for each axle as an effective means of enhancing the mobility of wheeled vehicles.

Keywords: vehicle mobility, off-road conditions, tire inflation pressure, separate pressure regulation, tire–soil interaction, cone index, UAZ-469, vehicle speed.

Постановка проблеми. Прохідність повнопривідних колісних транспортних засобів є визначальною експлуатаційною властивістю, оскільки вона забезпечує можливість виконання транспортних, технологічних і спеціальних завдань в умовах бездоріжжя. Експлуатація таких транспортних засобів відбувається на неоднорідних опорних поверхнях, що характеризуються змінними значеннями опору коченню та зчеплення, внаслідок чого падають показники мобільності. Одним із ключових регульованих факторів, який безпосередньо впливає на ефективність взаємодії шини з ґрунтом, є тиск повітря в шинах, оскільки він визначає радіальну деформацію, площу плями контакту та величину питомого тиску на опорну поверхню. Застосування традиційних систем централізованого регулювання тиску не враховує відмінностей умов роботи коліс різних осей, зумовлених нерівномірним розподілом навантажень і ущільненням ґрунту після проходження попередньої осі. Це зумовлює необхідність наукового обґрунтування доцільності роздільного регулювання тиску повітря в шинах як ефективного засобу підвищення показників опорної прохідності колісних автомобілів в умовах бездоріжжя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз умов експлуатації [21] автомобілів підвищеної прохідності показує, що для останніх типовим є рух по покриттях із різним ступенем нерівномірного розподілу опору коченню та зчеплення. У зв'язку з цим виникає потреба в реалізації необхідної сили тяги в різних умовах експлуатації, для забезпечення достатнього рівня мобільності, що зумовлює необхідність застосування заходів, спрямованих на забезпечення потрібної ефективності за рахунок підвищення середніх швидкостей руху та зниження затрат енергії на подолання опору рухові. Проаналізувавши всі доступні математичні моделі [6; 8; 10; 14; 16-22] взаємодії шин з опорною поверхнею, можна констатувати, що прохідність колісних транспортних засобів залежить від конструктивних параметрів автомобіля. До таких параметрів можна віднести компоновку шасі, навантаження на осі, ширину та висоту профіля шин, їхній діаметр та радіальну деформацію. Оскільки єдиним змінним параметром є радіальна деформація, яка у свою чергу залежить від тиску в шині, то проблема покращення показників взаємодії шини з опорною зводиться до забезпечення оптимального значення

тиску в шинах автомобіля. Саме тиск у шинах є одним із небагатьох регульованих факторів, що дозволяють «адаптувати» поведінку транспортного засобу до різних ґрунтових умов і підвищити його прохідність на м'яких або нестійких поверхнях.

Більшість сучасних автомобілів підвищеної прохідності оснащені системою централізованого регулювання тиску в шинах [3; 9; 15], яка дозволяє ситуативно, в межах певного діапазону, покращити тягово-зчіпні характеристики автомобіля. При зниженні тиску повітря в шинах зменшується тиск на ґрунт, збільшується площа плями контакту, зменшується глибина утвореної колії, водночас зростає деформація шини, що зумовлює збільшення втрат на внутрішнє тертя в оболонці шини, також зменшується максимально допустима швидкість руху та знижується ресурс шини. Тому залежно від фізико-механічних характеристик опорної поверхні існують оптимальні значення тиску повітря в шинах. Через неоднорідність ґрунту та різне вертикальне навантаження на осі автомобіля умови взаємодії з опорною поверхнею для кожного колеса відрізняються і зазвичай колеса другої і наступних осей рухаються вже по зміненому колесами передньої осі ґрунту, який відрізняється більшою щільністю. У результаті цього деформація та відповідно радіуси кочення передніх і задніх коліс є різними, тож виникає певний запас по тяговому зусиллі на кожній із наступних осей, який, на жаль, нівелюється системою централізованого регулювання тиску в шинах. Тому забезпечення оптимального для кожного колеса значень тиску в шинах може бути ефективним інструментом підвищення прохідності колісних автомобілів.

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання експериментальних швидкостей руху повнопривідного автомобіля УАЗ-469 при різних тисках повітря в шинах для оцінки адекватності розробленої у програмному середовищі MATLAB Simulink моделі руху [1; 2; 13]. Вказана модель визначає максимальну швидкість руху повнопривідного автомобіля за умови руху бездоріжжям (пісок із глибиною залягання більше ніж 1,5 м) з експериментальною оцінкою фізико-механічних характеристик конкретних ділянок ОП, за методикою визначення СІ. Окрім цього, завдання дослідження – експериментальна оцінка адекватності порогових значень прохідності СІ за методикою WES та MMP [13] для ділянки бездоріжжя з попередньо визначеними експериментальними значеннями СІ.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження виконували в умовах природного бездоріжжя з оцінкою найбільш значущого з умов виконання завдань показника – максимально можливої швидкості руху конкретними типом бездоріжжя. Згідно з класифікацією типів бездоріжжя, що визначено у [13], була підібрана горизонтальна ділянка протяжністю 105 м та шириною 25 м у межах території Ясницького кар'єру, розташованого на відстані

20 км на захід від м. Львова, що є піском із природною вологістю та перепадами висот профілю $\pm 0,1$ м, (рис. 1). Випробування виконували на автомобілі УАЗ-469 (рис. 2, а), що пройшов чергове ТО і ТК (рис. 2, б). Технічний стан автомобіля перебував у межах норм, що відповідають технічним умовам заводу виробника, нормативній та експлуатаційній документації. Пробіг автомобіля на початок випробувань становив 65 105 км.



Рис. 1. Супутниковий та загальний вигляд ділянки для експериментальних досліджень.
Fig. 1. Satellite and general view of the site for conducting experimental research.



Рис. 2. Експериментальні дослідження прохідності зразків колісної автомобільної техніки:
а – загальний вигляд автомобіля УАЗ-469; б – процес зважування та ТО.

Fig. 2. Experimental studies of the mobility of wheeled vehicle samples: a – general view of the UAZ-469 vehicle; b – the process of weighing and maintenance.

Таблиця 1. Короткі технічні характеристики УАЗ-469
Table 1. Key technical specifications of the UAZ-469

Модель автомобіля	Колісна формула	Маса, кг	Розподіл маси за осями		Питома потужність, кВт/т	Кліренс, мм	Шини
			Передня вісь, кг	Задня вісь, кг			
УАЗ 469	4x4	2105	1004	1101	26,26	300	235/75R15

Для проведення випробування автомобіль було споряджено згідно з технічною документацією та встановлено вимірювальні пристрої, вагові параметри визначено послідовним зважуванням при наїзді на платформу ваги коліс передньої та задньої осі. Процедуру зважування та технічний огляд проводили на базі ТзОВ «Автотранс-ДІК» із використанням сертифікованого обладнання, відповідність якого підтверджена чинним атестатом про акредитацію № 201506. Короткі технічні характеристики та результати зважування наведено у табл. 1.

На автомобілі були встановлені пневматичні шини типорозміру 235/75R15, з універсальним рисунком протектора, без видимих зовнішніх пошкоджень, із зношенням протектора не більше ніж 5 % від початкової висоти. Тиск повітря в шинах під-час проведення випробувань змінювався в діапазоні від мінімального (0,07 МПа) до максимального (0,20 МПа). Початковим етапом випробувань був контрольний пробіг зразка по маршруту не менше ніж 30 км із середньою швидкістю 40км/год, що сприяло прогріву агрегатів до робочих температур.



Рис. 3. Складові компоненти вимірювального комплексу: а – цифровий пенетрометр Лан-М PRO; б – зовнішній GNSS-приймач G-Mouse VK-162; в – цифровий манометр SDTG-4271

Fig. 3. Components of the measurement system: a – LAN-M PRO digital penetrometer; b – G-Mouse VK-162 external GNSS receiver; c – SDTG-4271 digital manometer.

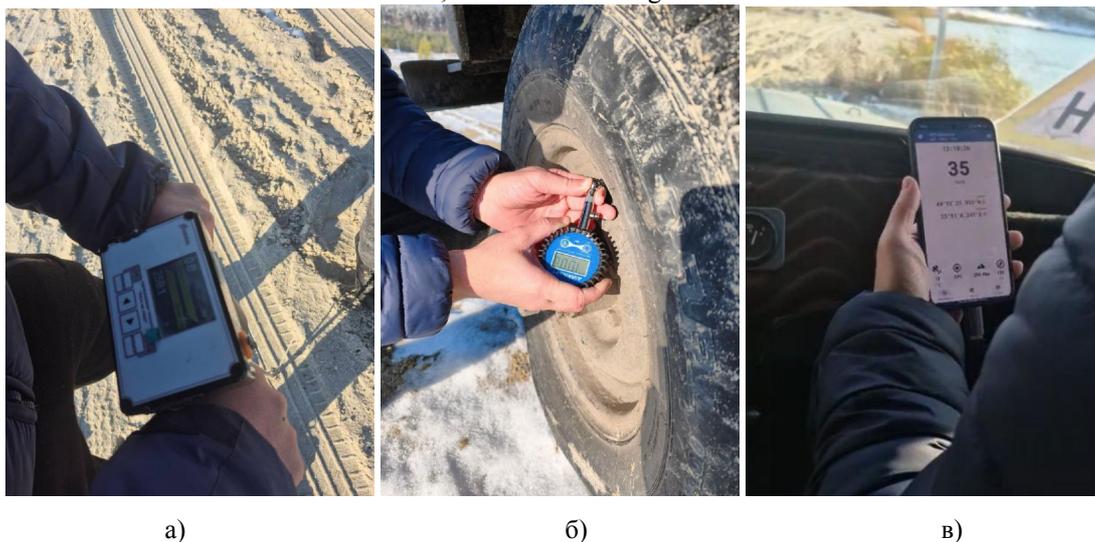


Рис. 4. Ключові етапи збору експериментальних даних: а – визначення конусного індексу ОП; б – регулювання тиску повітря в шинах; в – отримання значення максимальної швидкості руху.
Fig. 4. Key stages of experimental data collection: a – determination of the supporting surface cone index; b – regulation of tire inflation pressure; c – acquisition of the maximum vehicle speed value.

Для виконання поставлених завдань виконували заміри та реєстрацію таких параметрів: конусного індексу опорної поверхні, тиску повітря в шинах, радіальної деформації шин при різних тисках, пройденого автомобілем шляху, швидкості руху на визначеній ділянці бездоріжжя. Заміри вищевказаних параметрів виконували із синхронізацією процесу реєстрації, неперервність процесу забезпечувалася використанням вимірювального комплексу, до якого входили: портативний персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням, пенетрометр, що відповідає

стандарту ASAE S313.3 [4], зовнішній GNSS приймач із частотою вимірювань 10 Гц та цифровий манометр. Перед проїздами були визначені основні фізико механічні характеристики ОП досліджуваних ділянок, із використанням пенетрометра за методикою оцінки конусного індексу CI [5], прийнятою у стандартах із оцінки прохідності армій НАТО [17; 22].

На рис. 5 та в табл. 2 представлені результати експериментальних досліджень, що опосередковані за чотирьох-п'ятиразовим дублюванням і прокладанням першої колії.

Таблиця 2. Показники прохідності УАЗ-469 при різних значеннях тиску повітря в шинах
Table 2. Mobility indicators of the UAZ-469 at various tire inflation pressures

Показник прохідності	Розподіл тиску повітря в шинах p_1/p_2 , кПа					
	Централізований			Роздільний		
	200/200	150/150	100/100	150/200	100/150	70/100
CI, кПа	1565	1527	1200	1070	983	972
MN	11,01	11,52	12,29	11,25	11,85	12,6
MMP, кПа	370	337	302	349	313	288
V_{max} , км/год	15	23	30	33	35	36

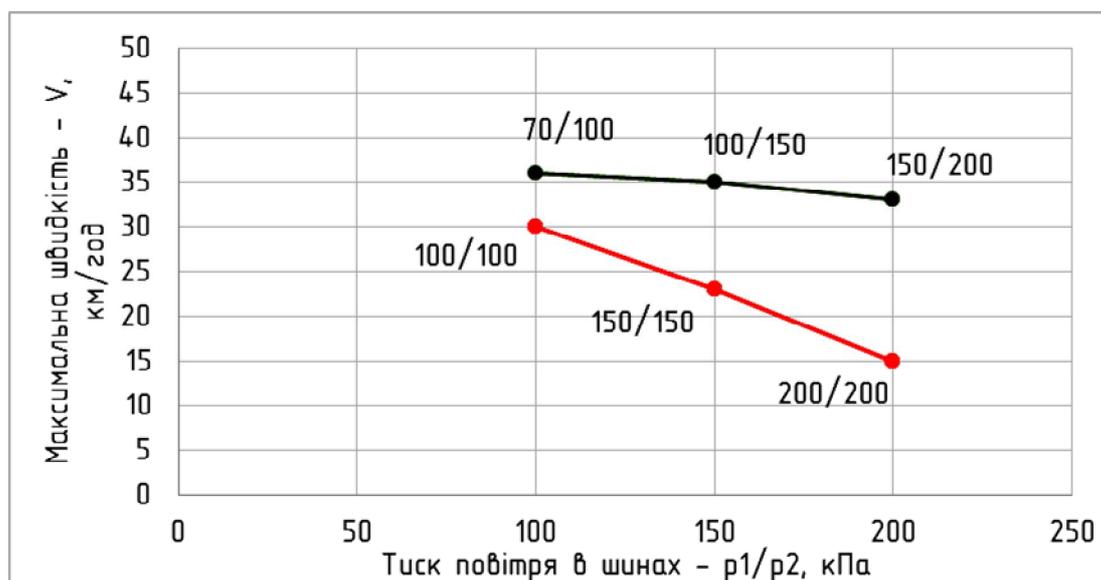


Рис. 5. Графіки отриманих результатів експериментальних значень швидкості руху бездоріжжям УАЗ-469 при різних тисках повітря в шинах.

Fig. 5. Graphs of the experimentally obtained off-road speed values of the UAZ-469 at various tire inflation pressures.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень слід констатувати підтвердження висунутої раніше гіпотези про підвищення прохідності за допомогою роздільного регулювання тиску повітря в шинах [12]. Встановлено, що підбір тиску в шинах для різних осей дозволяє повніше реалізувати тягово-зчіпний потенціал коліс, зумовлений

відмінностями у фізико-механічних характеристиках опорної поверхні та ступені її ущільнення після проходження передньої осі. Експериментально доведено, що за роздільного регулювання тиску повітря в шинах максимальна швидкість руху автомобіля УАЗ-469 бездоріжжям зростає в середньому на 15–20 % порівняно з централізованим

регулюванням. Одночасно зафіксовано покращення показників прохідності, визначених за методиками WES та MMP, що свідчить про підвищення ефективності взаємодії шини з ґрунтом та зниження питомих втрат енергії на подолання опору рухові.

Бібліографічний список

1. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22–31.
2. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Науково-виробничий журнал «Автомобілебудівництво України»*. 2020. № 2. С. 21–28.
3. Adams B. T. Central tire inflation for agricultural vehicle, 2002. 130 p.
4. ASAE Standards. S313.3. Soil cone penetrometer. ASAE. 2002.
5. ASAE Standards. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. ASAE. 2002.
6. Bekker M. G. Theory of land locomotion. The mechanics of vehicle mobility. The Univ. Michigan Press. 1956. 522 p.
7. Bradley A.H. Testing a Central Tire Inflation System in Western Canada Log-hauling Conditions. Vancouver. Forest Engineering Research Institute of Canada. 1993. Tech. Note TN-197.
8. Brixius W. W. Traction prediction equations for bias ply tires. *ASAE Paper*. 1987. № 87. P. 1622.
9. Central Tire Inflation: Demonstration Tests in the South. New. USDA Forest Service. General Technical Report SO-78.
10. Freitag D. R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *J Terramechanics*. 1966. № 3. P. 51–68.
11. Hrubel M., Krainyk L., Mikhalieva M., Zalyпка V., Manziak M., Khoma V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A. Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 128. P. 64–72.
12. Khoma V. Efficiency of differential pressure regulation in tires under conditions of off-road passability and mobility. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*. 2024. №27. P. 22–26.
13. Khudaverdian G., Khoma V., Krainyk L. Simulation modeling of field movement of four-wheel drive vehicles in the MATLAB Simulink software environment. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*. 2022. №26. P. 164–170.
14. Maclaurin E. B. The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils. *Proceedings of the 7th European ISTVS Conference*, Ferrara, Italy, 8-10 October. 1997. P. 391–398.
15. Pletts T. A literature overview of central tyre inflation systems. Pietermaritzburg, University of KwaZulu-Natal, 2006. 25 p.
16. Rummer R., Ashmore C. Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders. *ASAE Paper*. 1985. № 85–1611. 15 p.
17. Saarilahti M. Soil interaction model. Development of protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites. 2002. 43 p.
18. Sharma A. K., Pandey K. P. Traction data analysis in reference to a unique zero condition. *J Terramechanics*. 1998. № 5. P. 179–88.
19. Turnage G. W. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations. *Proceedings of the 4th International ISTVS Conference*, Stockholm – Kiruna, Sweden, April 24–28. 1972. P. 62–82.
20. Wismer R. D., Luth H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *J Terramechanics*. 1973. № 10. P. 49–61.
21. Wong J. Theory of ground vehicles. 3rd ed. NY: John Wiley and Sons, Inc., 2001. 528 p.
22. Wong Y. C.D. An assessment of land vehicles trafficability. *DSTA HORIZONS*. 2016. P. 54–63.

Стаття надійшла 10.02.2025

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Маркіян Гошко¹, к. т. н., Тетяна Гошко², к. е. н., Іван Дробот¹, ст. викладач

¹Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: m121314@ukr.net;

²Національний університет «Львівська Політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Львівська обл., Україна,
e-mail: tetiana.d.hoshko@lpnu.ua

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.70-78>

Гошко М., Гошко Т., Дробот І. Дослідження характеристик світлодіодних джерел світла

Досягнення у галузі фізики напівпровідників, оптики й оптоелектроніки за останні 10–15 років дозволили створити джерела світла з енергетичною ефективністю в 4–10 разів та тривалістю горіння у 30–100 разів більшою порівняно з лампами розжарювання. До таких джерел світла відносять твердотілі світлодіоди (СД). Про переваги СД та прогнози їхнього розвитку на перспективу останнім часом у світлотехнічних виданнях опубліковано надзвичайно багато матеріалів. Наші багаторічні дослідження показали, що в багатьох випадках задекларовані виробником характеристики не відповідають реальним значенням. Тому було сформульоване завдання дослідити реальні характеристики наявних сьогодні на ринку України світлодіодних ламп і відповідно обрати найефективніші з них.

Розглянуто питання дослідження характеристик сучасних джерел світла на прикладі СВД ламп. Досліджено світлодіодні лампи LED A60 10W, IEK A60 11W, Horoz Electric 10W, Eurolamp 9W, HOPFEN 10W, TECHLAMP 10W, Emilight 11W, OSRAM 10,5W, LEBRON LED 10W та Light Master 11W на відповідність задекларованих світлотехнічних та електротехнічних параметрів, а також з метою порівняльного аналізу наявних на ринку України (на січень 2025 року).

Досліди були проведені на кафедрі електротехнічних систем на базі лабораторії електроосвітлення.

У ході експериментів досліджено параметри: освітленість залежно від напруги живлення, рівень пульсацій світлодіодних ламп залежно від напруги живлення, температурний режим світлодіодних ламп залежно від напруги живлення, залежність споживаної потужності світлодіодних ламп від напруги живлення, світловіддачу LED-ламп залежно від напруги живлення. За результатами дослідів був проведений аналіз за вказаними параметрами і сформовані висновки та пропозиції.

Ключові слова: світлодіодні лампи, освітленість, рівень пульсацій світлодіодних ламп, температурний режим, світловіддача LED-ламп.

Hoshko M., Hoshko T., Drobot I. Research on the characteristics of LED light sources

Advances in semiconductor physics, optics, and optoelectronics over the past 10 to 15 years have enabled the development of light sources that are 4 to 10 times more energy-efficient and have a lifespan 30 to 100 times longer than traditional incandescent lamps. One significant type of these light sources is solid-state LEDs. Recently, numerous articles have been published in lighting journals discussing the advantages of LEDs and predicting their future developments. However, our extensive research has indicated that, in many cases, the performance characteristics claimed by manufacturers do not match the actual values. This led us to investigate the true characteristics of LED lamps currently available on the Ukrainian market, to identify the most effective options.

This study focuses on the characteristics of modern light sources, using LED lamps as an example. We examined several brands, including LED A60 10W, IEK A60 11W, Horoz Electric 10W, Eurolamp 9W, HOPFEN 10W, TECHLAMP 10W, Emilight 11W, OSRAM 10.5W, LEBRON LED 10W, and Light Master 11W, to evaluate their compliance with declared lighting and electrical parameters. The analysis was conducted using products available in the Lviv market as of June 2025.

The experiments took place at the Department of Electrical Engineering Systems within the Electric Lighting Laboratory.

Several parameters were investigated, including illumination levels based on the supply voltage, the pulsation levels of the LED lamps in relation to the supply voltage, the temperature conditions of the lamps with regard to the supply voltage, power consumption relative to the supply voltage, and the light output of the LED lamps concerning the supply voltage.

Following the experiments, we analyzed the results according to the above parameters and formulated conclusions and recommendations based on our findings.

Keywords: LED lamps, illumination, pulsation level of LED lamps, temperature regime, light output of LED lamps.

Постановка проблеми. Досягнення в галузі фізики напівпровідників, оптики й оптоелектроніки за останні 10–15 років дозволили створити джерела світла з енергетичною ефективністю в 4–10 разів та

тривалістю горіння в 30–100 разів більшою порівняно з лампами розжарювання. До таких джерел світла відносять твердотілі світлодіоди (СД). Про переваги СД та прогнози їхнього

розвитку на перспективу останнім часом у світлотехнічних виданнях опубліковано надзвичайно багато матеріалів. Наші багаторічні дослідження показали, що в багатьох випадках задекларовані виробником характеристики не відповідають реальним значенням. Тому було сформульоване завдання дослідити реальні характеристики, наявних в даний момент на ринку України, світлодіодних ламп і відповідно вибрати найефективніші з них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні світлодіоди характерні високою енергоефективністю, що робить їх одними з найбільш перспективних джерел світла в багатьох галузях [2; 4; 10]. Світлодіоди часто об'єднують у світлодіодні модулі, які є ключовими компонентами нових освітлювальних систем, що забезпечують високу ефективність, стабільність і надійність роботи в різних сферах застосування – від побутового до автомобільного та промислового освітлення. Світлодіодні модулі складаються з одного або декількох світлодіодів [3; 8], розміщених на загальній підкладці з інтегрованими елементами тепловідведення, а часто і з додатковими компонентами, такими як резистори, що обмежують струм, оптичні елементи та системи керування. Такий підхід дозволяє рівномірно розподілити тепло, покращуючи тепловий режим роботи світлодіодів, знижуючи ризик перегріву та збільшуючи довговічність. Крім того, об'єднання світлодіодів у модуль дозволяє ефективніше керувати розподілом світла та досягати оптимальних оптичних характеристик.

Світлодіодні модулі можна інтегрувати в різні конструкції з покращеним тепловідведенням та оптимізованими оптичними характеристиками. Вони можуть бути розроблені для специфічних застосувань, забезпечуючи потрібний рівень яскравості, колірної температури та напрямку світлового потоку [5; 6; 7; 9]. Це робить їх надзвичайно

гнучкими для використання в різноманітних умовах та середовищах.

Необхідно дослідити дійсні параметри світлодіодних ламп (заявлені часто не відповідають дійсності), наявних на ринку. На основі таких досліджень сформулювати рекомендації щодо вибору та компонування ламп.

Постановка завдання. Наше завдання – проаналізувати реальні характеристики наявних сьогодні на ринку України світлодіодних ламп і відповідно вибрати найефективніші з них, дослідивши такі параметри:

- освітленість залежно від напруги живлення;
- рівень пульсацій світлодіодних ламп залежно від напруги живлення;
- температурний режим світлодіодних ламп залежно від напруги живлення;
- залежність споживаної потужності світлодіодних ламп від напруги живлення;
- світловіддачу LED-ламп залежно від напруги живлення.

Виклад основного матеріалу. Досліджено характеристики сучасних джерел світла на прикладі СВД ламп. Ми досліджували світлодіодні лампи *LED A60 10W, IEK A60 11W, Horoz Electric 10W, Eurolamp 9W, HOPFEN 10W, TECHLAMP 10W, Emilight 11W, OSRAM 10,5W, LEBRON LED 10W* та *Light Master 11W* на відповідність задекларованих світлотехнічних та електротехнічних параметрів, а також із метою порівняльного аналізу наявних на ринку України (на січень 2025 року).

Досліди проводили на кафедрі електротехнічних систем на базі лабораторії електроосвітлення (табл., рис. 1–2) згідно зі стандартними методиками ДБН В.2.5.-28-2006 [1].

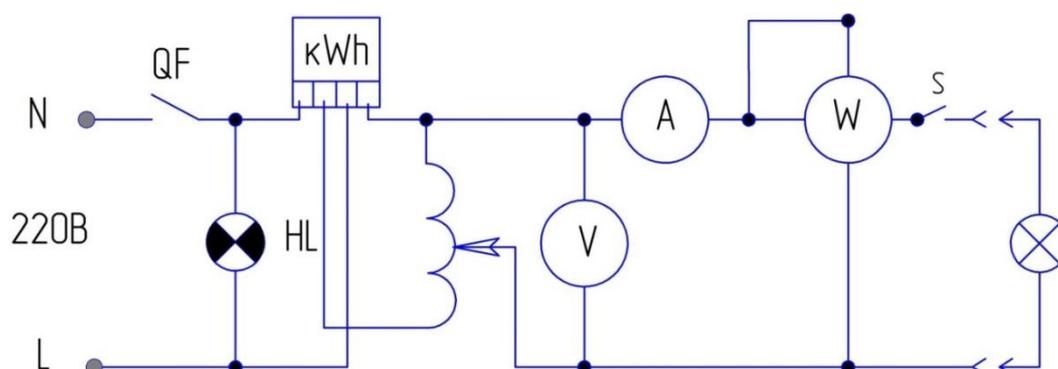


Рис. 1. Експериментальна схема дослідження лампи

Fig. 1. Experimental scheme for lamp research



Рис. 2. Загальний вигляд експериментального стенда

Fig. 2. General view of the experimental stand

Таблиця 1. Вимірювальні прилади

Table 1. Measuring devices

ПРИЛАД	МАРКА	РОБОЧИЙ ДІАПАЗОН	ПОХИБКА
АМПЕРМЕТР ЛАБОРАТОРНИЙ	Е 523	0 – 1 А	3%
ВОЛЬТМЕТР ЛАБОРАТОРНИЙ	Е 351	0 – 600 В	3%
ВАТМЕТР ЛАБОРАТОРНИЙ	Д 5004	0 – 1200 Вт	3%
ЛЮКСОМЕТР	Snakol SK-8201	0.5 – 300000 Lx	2%
ПІРОМЕТР	ANENG GM 550	-50 °С – 550 °С	2%
ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПУЛЬСАЦІЇ	RADEX LUPIN	1 – 99 %	3%

Під час експериментів досліджено параметри:

- освітленість залежно від напруги живлення (вимірювалась люксометром);
- рівень пульсацій світлодіодних ламп залежно від напруги живлення (вимірювалась пульсометром);
- температурний режим світлодіодних ламп залежно від напруги живлення (вимірювалась пірометром);
- залежність споживаної потужності світлодіодних ламп від напруги живлення (вимірювалась ваттметром);
- світловіддачу LED-ламп залежно від напруги живлення.

Аналіз світлотехнічних характеристик світлодіодних ламп різних виробників показано на рис. 3–7.

Освітленість

На рис. 3 порівняно освітленість (лк) світлодіодних ламп, що мають схожі номінальні потужності – у межах 9–11 Вт, з одним винятком (PHILIPS 6,5 Вт). Метою дослідження було виявити залежність між виробником лампи та її фактичною

світловіддачею за однакової напруги живлення (U , В). Усі вимірювання освітленості проводили за однакових умов, що дозволяє порівнювати результати без впливу зовнішніх чинників.

Аналізуючи дані, бачимо, що середньостатистичне значення освітленості для більшості ламп коливається в межах 900–1200 лк. Найвищі показники демонструють моделі Emilight 11W, OSRAM 10.5W та ІЕК А60 11W – ці пристрої стабільно забезпечують освітленість понад 1200 лк за звичайної напруги. Висока світловіддача таких моделей свідчить про ефективну оптичну конструкцію, якісні світлодіоди та оптимізовану тепловіддачу, що не спричиняє деградації джерела світла в короткостроковій перспективі.

Водночас моделі, як-от PHILIPS 6,5W, демонструють значно нижчу освітленість – близько 650–785 лк. Цей результат можна пояснити меншою номінальною потужністю, а також, можливо, специфікою розподілу світлового потоку (наприклад, фокусування на вузький кут освітлення). Такі лампи більше підходять для локального освітлення або декоративних цілей, а не для загального освітлення приміщень.

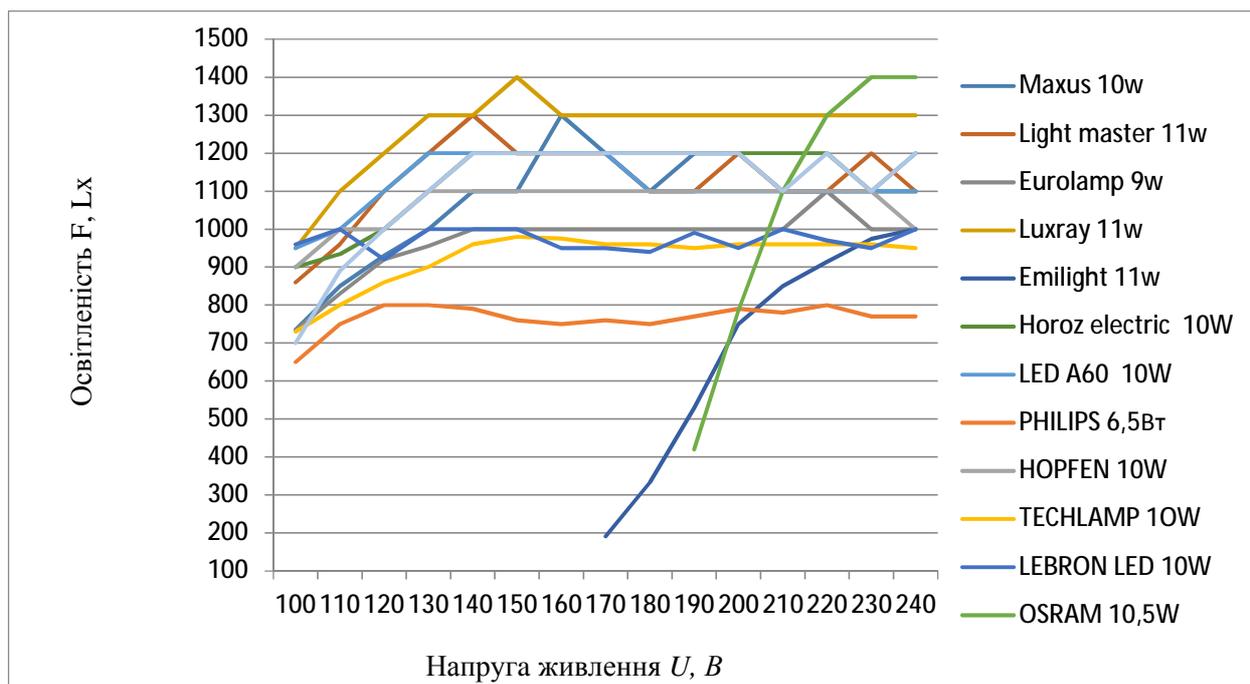


Рис. 3. Аналіз рівня освітленості світлодіодних ламп залежно від напруги живлення
Fig. 3. Analysis of the illumination level of LED lamps depending on the supply voltage

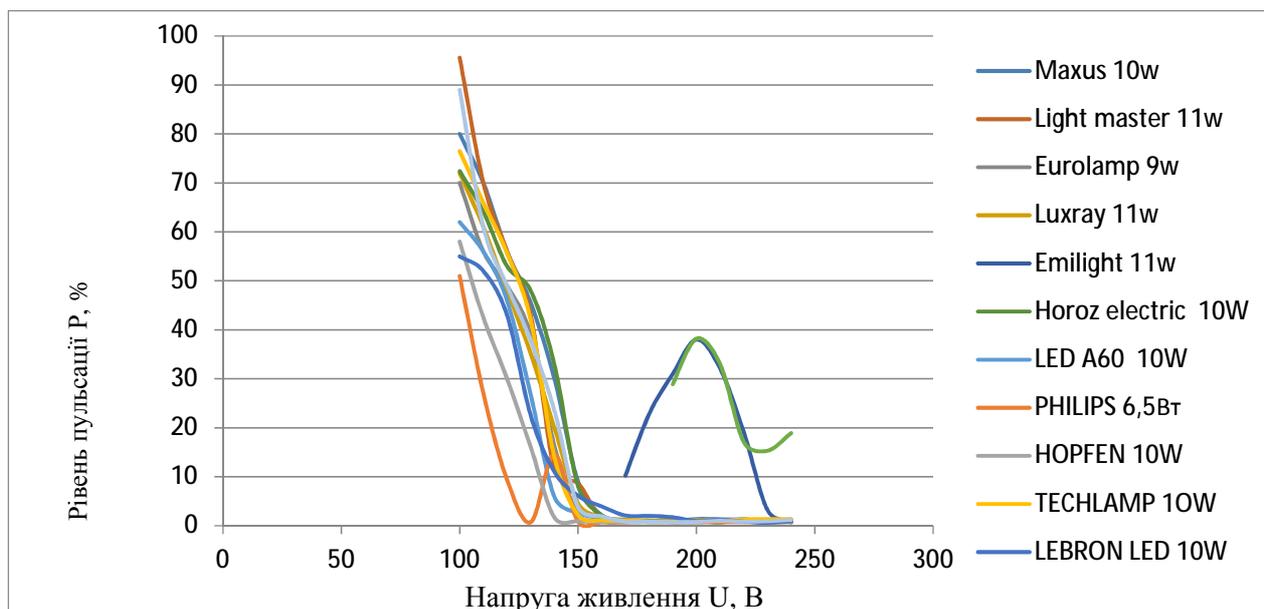


Рис. 4. Аналіз рівня пульсацій світлодіодних ламп залежно від напруги живлення
Fig. 4. Analysis of the pulsation level of LED lamps depending on the supply voltage

Також варто звернути увагу на моделі TECHLAMP 10W та LEBRON LED 10W, які при заявленій потужності демонструють помірну освітленість (від 730 до 990 лк), що ставить під питання ефективність перетворення електроенергії в світло. Можливо, у цих виробників використовується менш ефективна світлодіодна

технологія або відсутній якісний драйвер струму, що впливає на світлові характеристики.

Цікаво, що лампи з однаковими технічними характеристиками (наприклад, Maxus 10W та LED A60 10W) можуть демонструвати суттєво різні показники освітленості. Це вказує на те, що бренд і заявлена потужність – ще не гарантія ефективності.

Отож, при виборі освітлювального обладнання для побуту чи професійного використання важливо спиратися не лише на маркетингові заяви виробників, а й на емпіричні дані випробувань.

Загалом результати показують, що на ринку LED-ламп спостерігається суттєва варіативність у світлотехнічних характеристиках. Це створює передумови для подальших досліджень у напрямі стандартизації освітленості, аналізу енергоефективності та визначення оптимального співвідношення між ціною, якістю та функціональністю LED-джерел світла.

Аналіз рівня пульсації світлодіодних ламп залежно від напруги живлення

Порівняємо пульсації світлового потоку (% *P*) світлодіодних ламп тринадцяти виробників у діапазоні напруги від 100 до 240 В. Метою аналізу є виявлення технічних переваг окремих брендів, стабільності світлового потоку при змінній напрузі, а також відповідності нормам комфортного освітлення, згідно з якими допустимий рівень пульсації не повинен перевищувати 5 %.

Тенденції зміни пульсації

Більшість моделей демонструють загальну тенденцію до зниження рівня пульсації зі зростанням напруги живлення. Наприклад, лампа *LED A60 10W*, *IEK A60 11W*, *Horoz Electric 10W*, *Eurolamp 9W* та *HOPFEN 10W* має пульсацію 51 % при 100 В, але вже при 160 В вона становить лише 0,7 %, і тримається в межах 0,7–0,8 % при 180–240 В. Схожу поведінку мають *LED A60 10W*, *IEK A60 11W*, *Horoz Electric 10W*, *Eurolamp 9W* та *HOPFEN 10W*. Ці моделі демонструють значне падіння пульсації нижче 1 % вже при 150–160 В, що свідчить про якісну систему живлення з ефективною компенсацією імпульсів.

Лампа *IEK A60 11W*, зокрема, має пульсацію 89 % при 100 В, але вже при 160 В значення падає до 1,91 %, і продовжує зменшуватися до 0,83 % на 170 В. Це підтверджує наявність добре спроектованого драйвера, здатного стабілізувати струм за стандартного електроживлення.

Лампи з високим рівнем пульсації

Окремі моделі мають надмірно високі показники навіть за напруги понад 200 В. *Emilight 11W* зберігає пульсацію 38 % при 200 В, і лише при 240 В падає до 0,7 %. Модель *OSRAM 10,5W* стартує з високих значень, і попри поступове зниження, має пульсацію понад 18 % при 240 В – перевищення допустимого рівня більш ніж утричі.

Умовно придатні моделі

Лампи *TECHLAMP 10W*, *LEBRON LED 10W* та *Light Master 11W* демонструють перехідний характер: високі пульсації на старті (55–96 %), але

поступове зниження до 1–2 % на ділянці від 170 В і вище. За умови стабільного електроживлення їх можна розглядати як допустимі для використання в умовах меншої візуальної навантаженості.

Отже:

- Лампи брендів *PHILIPS*, *LED A60*, *IEK*, *Horoz Electric*, *Eurolamp*, *HOPFEN* забезпечують стабільно низьку пульсацію за звичайної напруги (220–240 В), що дозволяє рекомендувати їх для щоденного використання.

- Моделі *OSRAM*, *Emilight* мають підвищену пульсацію навіть на високій напрузі, що може негативно впливати на зорове сприйняття.

- Показники пульсації мають бути одним із ключових критеріїв при виборі лампи, особливо для освітлення робочих місць, навчальних закладів чи житлових приміщень.

Аналіз температурного режиму світлодіодних ламп залежно від напруги живлення

У межах експериментального дослідження виконано порівняльний аналіз температури корпусу світлодіодних ламп тринадцяти виробників при змінній напрузі живлення від 100 В до 240 В. Температура (*T*, °C), як один із критичних параметрів експлуатації світлодіодів, безпосередньо впливає на стабільність світлового потоку, термін служби елементів та ефективність тепловіддачі. Завищена температура може призвести до деградації кристалу, зниження яскравості, змін спектру випромінювання та передчасного виходу з ладу.

Загальні закономірності

Усі моделі демонструють очікуване зростання температури корпусу зі збільшенням напруги живлення. Найнижчі температурні значення фіксуються при 100 В (25–33 °C), найвищі – у діапазоні 220–240 В, де окремі лампи досягають понад 60 °C. Наприклад, *Light Master 11W* при 240 В має температуру 54 °C, *Luxray 11W* – 50,7 °C, *Emilight 11W* – 33,8 °C, а *Maxus 10W* – 40 °C.

Стабільне температурне зростання спостерігається в ламп *Eurolamp 9W*, *TECHLAMP 10W*, *LEBRON 10W* та *LED A60 10W* – у діапазоні від 25 °C до 45 °C, без різких стрибків. Це може свідчити про наявність ефективної системи тепловідведення: радіаторної конструкції, термостійких матеріалів або стабілізуючого драйвера.

Аномальні поведінкові особливості

Деякі моделі демонструють нетипові температурні скачки або зниження при зростанні напруги, що потребує додаткового дослідження. Наприклад, *OSRAM 10,5W* також має непостійний температурний профіль – при 190 В: лише 24,9 °C, тоді як при 220 В вже 42 °C, що вимагає додаткової перевірки на надійність внутрішніх компонентів.

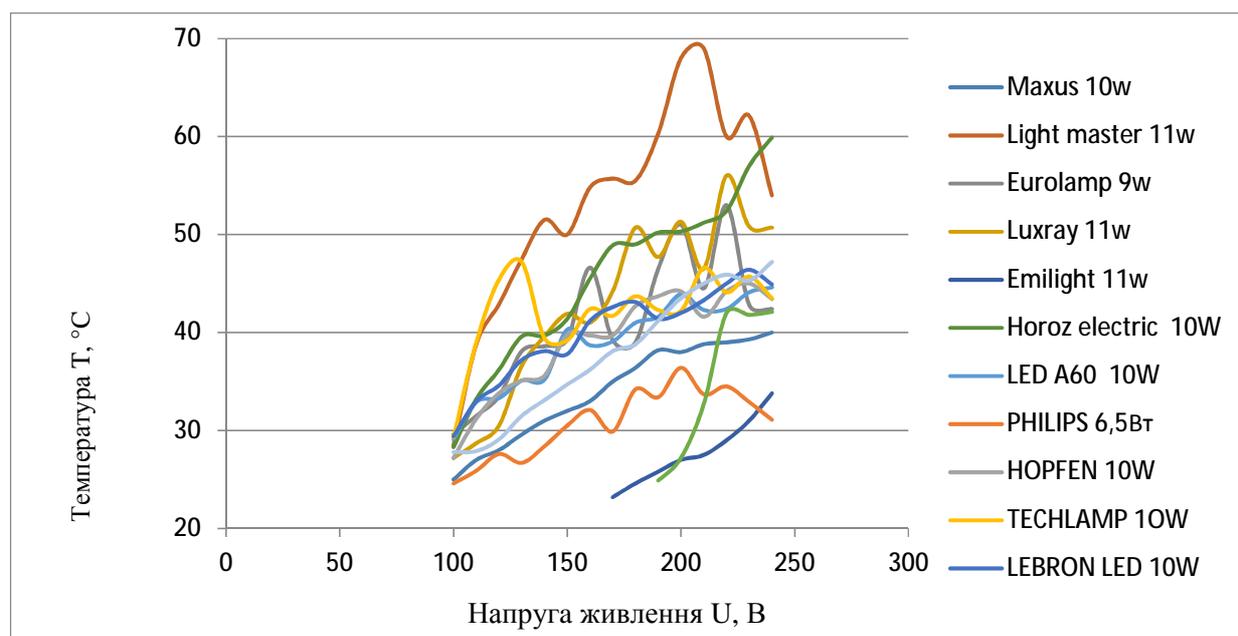


Рис. 5. Аналіз температурного режиму світлодіодних ламп залежно від напруги живлення
Fig. 5. Analysis of the temperature regime of LED lamps depending on the supply voltage

Надмірне нагрівання

Найвищі температурні значення у всьому діапазоні напруги фіксуються в ламп *Light Master 11W* (до 69 °C при 210 В) та *Luxray 11W* (56 °C при 220 В). Такі значення є критичними і можуть викликати швидку деградацію світлодіодного кристалу, зниження терміну служби, зміну світлових характеристик і навіть становити ризик перегріву в замкнених освітлювальних приладах. У таких випадках рекомендовано зовнішнє охолодження або використання у відкритих світильниках.

Отже:

- Найбільш стабільними за температурним режимом є моделі *LED A60*, *PHILIPS*, *Eurolamp*, *IEK*, *Horoz Electric*, *TECHLAMP*, *LEBRON*.

- Лампи *Light Master* та *Luxray* демонструють ризик перегріву, що варто враховувати при виборі для тривалого освітлення в замкнених просторах.

- Нестабільні температурні коливання *OSRAM* потребують додаткового тестування на предмет внутрішньої термічної стабільності.

Загалом температурний режим лампи є важливим параметром, який має враховуватись при проектуванні освітлювальних систем, особливо в умовах високих експлуатаційних навантажень. Дослідження відкриває перспективу стандартизації теплових характеристик світлодіодної продукції поряд із яскравістю та пульсацією.

Аналіз залежності споживаної потужності світлодіодних ламп від напруги живлення

Світлодіодні лампи є одними з найпоширеніших джерел штучного освітлення завдяки

своїй енергоефективності та довговічності. Одним із важливих параметрів, що впливає на їхню ефективність та стабільність роботи, є фактична споживана потужність при різній нарузі живлення. На рис. 6 наведено порівняння значень потужності (P, Вт) для моделей тринадцяти виробників у діапазоні напруги 100–240 В. Аналіз цієї залежності дозволяє оцінити якість драйверів струму, стабілізацію потужності та відповідність заявленим технічним характеристикам.

Основні закономірності

Більшість моделей демонструють поступове зростання споживаної потужності зі збільшенням напруги живлення. Це очікуване явище, однак варто звернути увагу на стабільність цього зростання, відсутність різких піків, а також відповідність значенням, заявленим виробником. Зокрема модель *Maxus 10W* стартує з 7,5 Вт при 100 В, і плавно досягає приблизно 16,8 Вт при 240 В. Аналогічну поведінку демонструють *LED A60 10W*, *Horoz Electric 10W*, *TECHLAMP 10W*, *LEBRON LED 10W*, *IEK A60 11W*, які мають стабільні профілі росту.

Модель *PHILIPS 6,5 Вт* має нижчі значення на всіх рівнях напруги, що відповідає її номінальній потужності. Водночас інші лампи – *Light Master 11W*, *Luxray 11W*, *Emilight 11W* – на середньому та високому рівнях напруги перевищують заявлені потужності на 20–40%, досягаючи 18–22 Вт при 240 В. Такий рівень відхилення може свідчити про відсутність обмеження споживаної потужності, а також можливе внутрішнє перевантаження компонентів, що знижує ефективність і ресурс лампи.

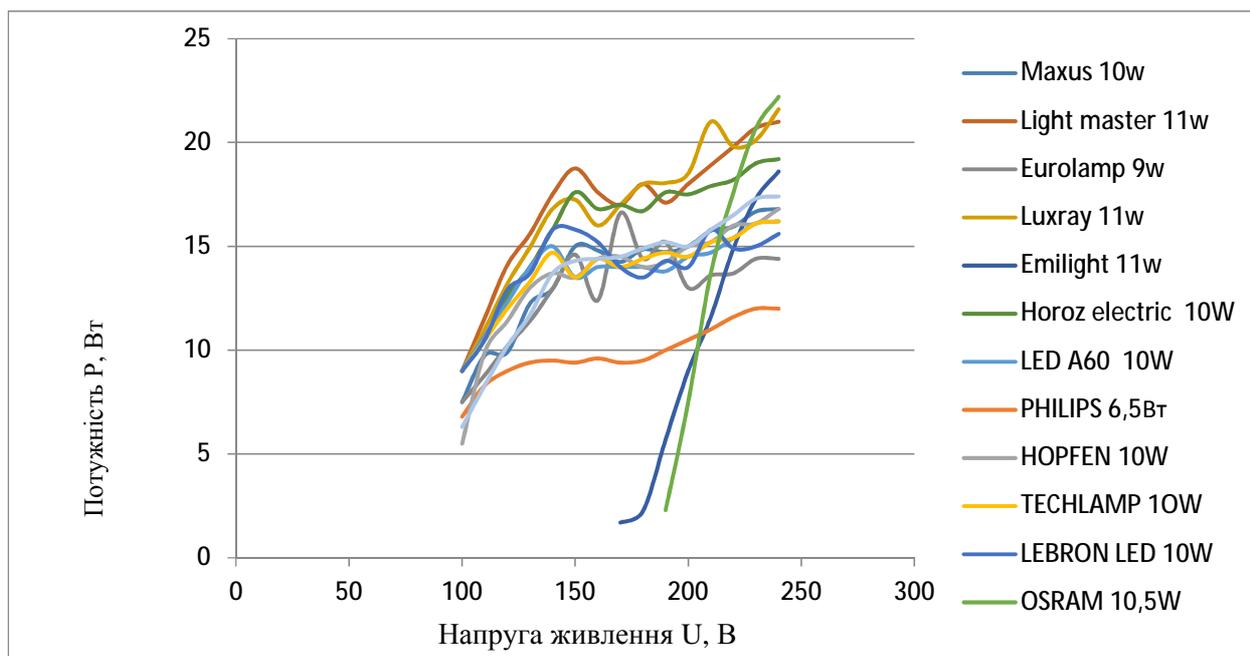


Рис. 6. Залежність повної споживаної потужності світлодіодних ламп від напруги живлення
Fig. 6. Dependence of the total power consumption of LED lamps on the supply voltage

Аномалії та нестабільність

Варто відзначити *Emilight*, яка при деяких значеннях напруги (наприклад, 170–200 В) має помітно нижчі значення потужності – до 1,7–9 Вт – при заявлених 11 Вт. Це може вказувати на вбудовану систему обмеження або нестабільне функціонування драйвера.

Отже:

- Більшість моделей демонструють очікуване зростання потужності, проте відхилення понад 30 % від номінальних значень потребують уваги.

- Лампи з вираженими піками або нестабільною поведінкою (*Light Master*, *Emilight*, *Luxray*) можуть спричинювати перегрів і зниження терміну служби.

- Моделі *Maxus*, *LED A60*, *Horoz*, *TECHLAMP*, *IEK*, *LEBRON* демонструють стабільність і можуть бути рекомендовані як надійні джерела світла.

Результати дослідження показують важливість тестування ламп не лише за світловими, а й за електричними параметрами, що впливає на безпеку та ефективність використання в побутових і промислових умовах.

Аналіз світловіддачі LED-ламп залежно від напруги живлення

Світловіддача – один із ключових показників ефективності світлодіодних ламп, що визначає, скільки світла виробляється на одиницю спожитої електроенергії. Цей параметр має принципове

значення для енергоощадності, екологічної безпеки та економічної ефективності систем освітлення. У межах дослідження проведено вимірювання світловіддачі 13 моделей LED-ламп при змінній напрузі живлення в діапазоні від 100 до 240 В. Порівняння дає змогу оцінити стабільність характеристик, придатність ламп до роботи в умовах нестабільної електромережі та відповідність заявленим параметрам.

Загальні закономірності

Аналіз показав, що більшість моделей мають максимальну світловіддачу при зниженій або стандартній напрузі (120–140 В). Наприклад, *Emilight 11W* при 180 В демонструє пікове значення – 148 лк/Вт, що є найвищим серед усіх протестованих зразків. Водночас при нижчих або вищих напругах цей показник значно зменшується (54–60 лк/Вт при 230–240 В), що свідчить про наявність чутливості драйвера лампи до коливань напруги.

Інші моделі, такі як *HOPFEN 10W*, *TECHLAMP 10W*, *PHILIPS 6,5W* та *LED A60 10W*, демонструють більш стабільну поведінку: їхня світловіддача змінюється в межах 60–85 лк/Вт без різких коливань при зміні напруги. Така поведінка свідчить про якісну стабілізацію напруги всередині корпусу лампи, що позитивно впливає на світлотехнічну надійність виробу. Деякі моделі мають незбалансовану світлову ефективність. Це може свідчити про нестабільність роботи драйвера, що не забезпечує оптимального перетворення електроенергії в світловий потік.

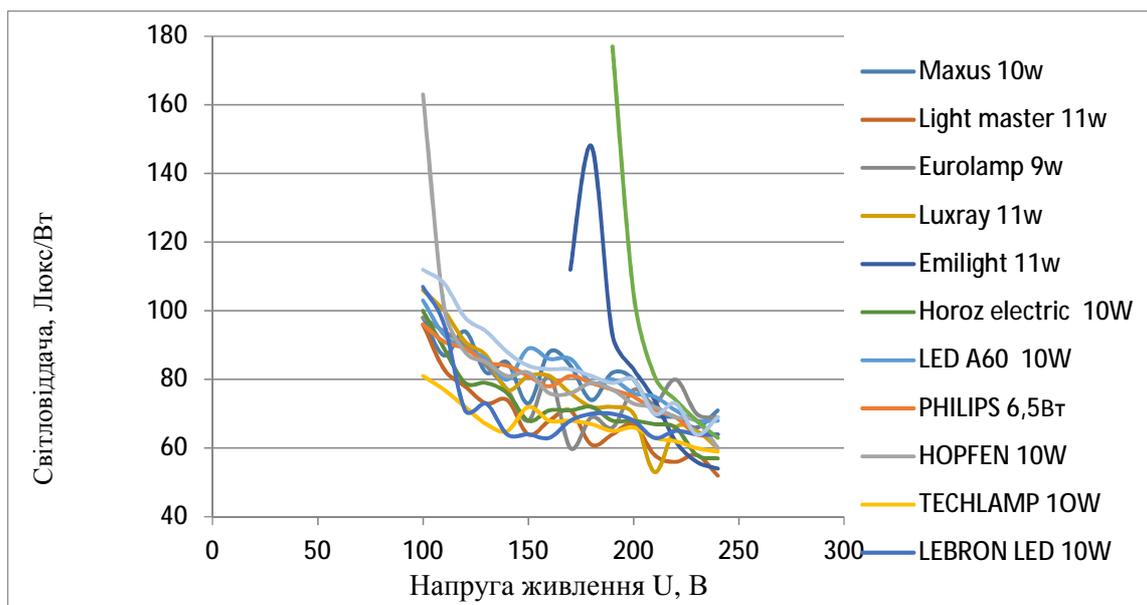


Рис. 7. Залежність світловіддачі LED-ламп від напруги живлення

Fig. 7. Dependence of light output of LED lamps on supply voltage

Отже:

- Найкращий результат продемонструвала *Emilight 11W* при 180 В, однак її світловіддача є нестабільною у ширшому діапазоні.

- Моделі *TECHLAMP*, *LED A60*, *HOPFEN*, *PHILIPS* мають більш рівномірну світловіддачу, що є ознакою високої стабільності.

- Моделі *Light Master*, *Luxray*, *LEBRON* виявляють нестабільну ефективність, тому їх слід використовувати з урахуванням стабільності напруги.

Результати демонструють важливість врахування параметра світловіддачі не лише при виборі лампи, а й за її використання у нестабільних енергосистемах. Подальші дослідження можуть охоплювати спектральні характеристики та часову деградацію світлового потоку.

Висновки

Досліджено характеристики сучасних джерел світла на прикладі СВД-ламп, зокрема *LED A60 10W*, *IEK A60 11W*, *Horoz Electric 10W*, *Eurolamp 9W*, *HOPFEN 10W*, *TECHLAMP 10W*, *Emilight 11W*, *OSRAM 10,5W*, *LEBRON LED 10W* та *Light Master 11W*, на відповідність задекларованих світлотехнічних та електротехнічних параметрів, а також з метою порівняльного аналізу наявних на ринку України (на січень 2025 року).

1. Ефективність освітлення (освітленість, лк)

Моделі *Emilight 11W*, *Luxray 11W*, *TECHLAMP 10W*, *LEBRON 10W* та *IEK A60 11W*

демонструють найвищу освітленість у діапазоні напруги 200–240 В – від 1200 до 1400 лк. Це свідчить про високу яскравість, ефективну оптичну конструкцію та добру якість світлодіодів. *PHILIPS 6,5 Вт* має стабільно нижчу освітленість (~700–800 лк), що є очікуваним з огляду на номінальну потужність.

2. Комфортність світла (пульсація, %)

Найбільш комфортні моделі – *PHILIPS*, *LED A60*, *Horoz*, *Eurolamp*, *TECHLAMP*, *IEK*, *HOPFEN* – мають пульсацію <1% за напруги 160–240 В, що відповідає медичним нормам. *Maxus*, *OSRAM*, *Emilight*, *Luxray* та *Light Master* демонструють надмірно високі пульсації (>30%) за нижчих напруг, що може викликати зорове навантаження і втому.

3. Теплові характеристики (температура корпусу, °С)

Оптимальний температурний режим (<45 °С) підтримується у *PHILIPS*, *LED A60*, *Eurolamp*, *TECHLAMP*, *LEBRON*. *Luxray* та *Light Master* перегріваються до 69 °С, що підвищує ризик деградації елементів. *OSRAM* і *Emilight* показують нестабільність – різкі температурні коливання, які потребують додаткового тестування.

4. Стабільність енергоспоживання (споживана потужність, Вт)

Більшість ламп демонструють логічне зростання потужності зі збільшенням напруги, але *Light Master* має аномальний стрибок до 93,6 Вт при 130 В – критична нестабільність. *Emilight* місцями занижує споживання (до 1,7 Вт), що свідчить про некоректну роботу драйвера або обмеження.

5. Світлотехнічна ефективність (світловіддача, лк/Вт)

Найвищу світловіддачу (>140 лк/Вт) має *Emilight* при 180 В, але вона нестабільна при інших рівнях. *TECHLAMP*, *LED A60*, *PHILIPS*, *HOPFEN* демонструють стабільну ефективність у межах 70–85 лк/Вт. *Light Master*, *Luxray* та *LEBRON* мають найнижчі показники (до 13 лк/Вт) при окремих напругах.

Загальні рекомендації

- **До щоденного використання** рекомендуються моделі *LED A60*, *PHILIPS*, *TECHLAMP*, *IEK*, *Horoz Electric* – вони поєднують високу яскравість, стабільну світлову віддачу, низьку пульсацію та оптимальний тепловий режим.

- **Умовно допустимими** є *Eurolamp*, *LEBRON*, *HOPFEN*, якщо застосовуються за стабільного електроживлення.

- **Моделі з високим ризиком експлуатації** – *Light Master*, *Luxray*, *Emilight*, *OSRAM* – мають нестабільну потужність, перегрів або надмірну пульсацію, що не відповідає вимогам комфортного та безпечного освітлення.

Отже, комплексна оцінка LED-ламп за кількома параметрами дозволяє об'єктивно визначити якість продукції та її відповідність стандартам. Для споживача важливо звертати увагу не лише на яскравість чи бренд, а на підтвержені показники стабільності, енергоефективності та безпечності світлового потоку. Це дослідження може бути основою для формування національних стандартів сертифікації світлодіодної продукції в Україні.

Бібліографічний список

1. ДБН В.2.5.-28-2006. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28019 (дата звернення: 08.02.2025).

2. Пекур Д. В., Сорокин В. М. Стан і перспективи розвитку білих світлодіодів з випромінюванням, наближеним до природного. *Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка*. 2023. Вип. 58. С. 16–20. <https://doi.org/10.15407/іopt.2023.58.016>

3. Barbosa J. L. F., Coimbra A. P., Simon D., Calixto W. P. Optimization process applied in the thermal and luminous design of high power LED luminaires. *Energies*. 2022. Vol. 15, iss. 20. P. 7679. <https://doi.org/10.3390/en15207679>

4. Bhattarai T., Ebong A., Raja M. A review of light-emitting diodes and ultraviolet light-emitting diodes and their applications. *Photonics*. 2024. Vol. 11, № 6. P. 491. <https://doi.org/10.3390/photonics11060491>

5. Chinchero H. F., Alonso J. M., Hugo O. T. A review on smart LED lighting systems. *2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, LongBeach, CA, USA. 2020. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/igessc50231.2020.9285004>

6. Goshko M. The outer temperature effect on the characteristics of led lamps working characteristics. *TEKA. QUARTERLY JOURNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY*. 2021, Vol. 21, No. 1. P. 13–18.

7. Goshko M. Influence of the construction of start-up adjustment equipment of modern led lamps on their performance characteristics. *TEKA. QUARTERLY JOURNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY*. 2021. Vol. 20, № 2. P. 33–39.

8. Różowicz A., Wachta H., Baran K. et al. Arrangement of LEDs and their impact on thermal operating conditions in high-power luminaires. *Energies*. 2022. Vol. 15, iss. 21. P. 8142. <https://doi.org/10.3390/en15218142>

9. Taki T., Strassburg M. Review—Visible LEDs: more than efficient light. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2019. Vol. 9, № 1. P. 015017. <https://doi.org/10.1149/2.0402001jss>

10. Weisbuch C. Review – On the search for efficient solid state light emitters: past, present, future. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 016022. <https://doi.org/10.1149/2.0392001jss>

Стаття надійшла 10.02.2025

ОЦІНЮВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА

Степан Хімка, к. т. н., Олег Сукач, к. т. н., Мирон Магац, к. т. н., Юрій Габрієль, Ігор Дуфанець, Тарас Мельников

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: stepanhimka@gmail.com; 19oleg85@ukr.net; mironmahats@gmail.com; yuriygabriel@gmail.com;
dufaneci@gmail.com; taras.melnykov@gmail.com/*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.79-86>

Хімка С., Сукач О., Магац М., Габрієль Ю., Дуфанець І., Мельников Т. Оцінювання придатності електромобілів для локальної експлуатації на основі інтегрального показника

У статті розглядається актуальна науково-прикладна проблема обґрунтування вибору оптимальної моделі електромобіля для експлуатації в специфічних умовах міських агломерацій України. Сучасний розвиток транспортного ринку демонструє стрімке зростання інтересу до «чистих» технологій, проте цей процес стримується недосконалістю зарядної інфраструктури, нестабільністю енергопостачання та обмеженими фінансовими можливостями більшості споживачів. У зв'язку з цим виникає нагальна необхідність у розробці науково обґрунтованого підходу до комплексного оцінювання придатності транспортних засобів саме для локальних поїздок на невеликі відстані. У процесі дослідження виконано глибокий аналіз сучасних наукових праць і статистичних даних щодо динаміки ринку електромобілів, що дозволило визначити ключові критерії, які формують споживчі пріоритети. На відміну від наявних підходів, які часто фокусуються на максимальних технічних характеристиках, у роботі запропоновано удосконалену систему критеріїв оцінювання. До неї, окрім стандартних технічних (запас ходу, потужність зарядки, надійність) та економічних (вартість придбання, витрати на ТО) показників, інтегровано параметр «енергоефективність» (питома витрата електроенергії, кВт·год/100 км), що дозволяє точніше прогнозувати експлуатаційні витрати. Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексної методики багатокритеріального оцінювання, що базується на застосуванні вагових коефіцієнтів значущості критеріїв, адаптованих до українських реалій міської експлуатації, та нормалізації різнорідних параметрів за методом лінійного масштабування (min–max). Це дозволило привести вартісні, технічні та ергономічні показники до єдиної безрозмірної шкали оцінювання. Обґрунтовано розподіл вагових коефіцієнтів, де найвищий пріоритет отримала фінансова доступність (0,25), а енергоефективність та експлуатаційні витрати отримали вагомі частки (по 0,15), тоді як запас ходу для міського циклу визначено як другорядний фактор (0,15). Апробацію методики здійснено на прикладі шести найбільш популярних на українському ринку моделей: Nissan Leaf, Renault Zoe, Hyundai Kona Electric, Volkswagen e-Golf, Tesla Model 3 та Tesla Model Y. Розрахунок інтегрального показника придатності засвідчив, що для умов використання на невеликі відстані моделі компактного сегменту демонструють кращі результати: лідерами рейтингу стали Renault Zoe (інтегральний показник 7,95) та Hyundai Kona Electric (7,90). Вони забезпечують оптимальний баланс між початковими інвестиціями, експлуатаційними витратами та функціональністю. Технологічно досконаліші моделі Tesla отримали нижчі рейтинги (7,70–7,80) через високу вартість, яка є критичним фактором для масового споживача. Додатково проведений аналіз чутливості моделі показав, що при сценарії зростання тарифів на електроенергію конкурентна перевага зміщується на користь моделей з максимальною енергоефективністю (Hyundai Kona). Практична значущість отриманих результатів полягає у створенні універсального інструментарію для оптимізації вибору рухомого складу як приватними користувачами, так і корпоративними парками з метою мінімізації повної вартості володіння.

Ключові слова: електромобіль, міська експлуатація, критерії вибору, інтегральний показник, метод багатокритеріального аналізу, енергоефективність, питома витрата енергії.

Khimka S., Sukach O., Mahats M., Habriiel Yu., Dufanets I., Melnykov T. Assessment of electric vehicles suitability for local operation based on the integral indicator

This article addresses the important scientific and practical issue of selecting the optimal electric vehicle (EV) model for use in the specific conditions of urban agglomerations in Ukraine. The current trends in the transport market show a rapid increase in interest in "clean" technologies. However, this growth is hindered by inadequate charging infrastructure, unstable power supply, and the limited financial means of most consumers. Therefore, there is an urgent need to develop a scientifically grounded approach for comprehensively assessing vehicle suitability, particularly for local short-distance trips. During the research, a thorough analysis of contemporary scientific literature and statistical data regarding the dynamics of the EV market was conducted. This analysis allowed for the identification of key criteria that shape consumer priorities. Unlike existing approaches that often emphasize maximum technical specifications, this paper proposes an enhanced system of evaluation criteria. In addition to standard technical indicators (such as range, charging power, and reliability) and economic indicators

(such as purchase cost and maintenance costs), the parameter of "energy efficiency" (specific energy consumption measured in kWh/100 km) is incorporated. This inclusion enables more accurate forecasting of operational costs. The scientific novelty of this study lies in the development of a comprehensive multi-criteria assessment methodology. This methodology uses weighting coefficients to reflect the significance of each criterion, tailored to the realities of urban operation in Ukraine, and applies the linear scaling method (min-max) for normalizing diverse parameters. This approach allows for the consolidation of cost, technical, and ergonomic indicators into a single dimensionless evaluation scale. The distribution of weight coefficients was carefully justified, with financial affordability assigned the highest priority (0.25), while energy efficiency and operational costs each received significant weights (0.15). The range for urban cycle was considered a secondary factor (0.15). The methodology was tested using six of the most popular models available on the Ukrainian market: Nissan Leaf, Renault Zoe, Hyundai Kona Electric, Volkswagen e-Golf, Tesla Model 3, and Tesla Model Y. The calculation of the integral suitability indicator revealed that for short-distance use, compact models performed better. Renault Zoe (integral indicator of 7.95) and Hyundai Kona Electric (7.90) ranked the highest, providing an optimal balance of initial investments, operational costs, and functionality. In contrast, more technologically advanced Tesla models received lower ratings (ranging from 7.70 to 7.80) primarily due to their high costs, which are a critical concern for the average consumer. Additionally, sensitivity analysis indicated that in a scenario of rising electricity tariffs, the competitive advantage shifts toward models with the highest energy efficiency, such as the Hyundai Kona Electric. The practical significance of these results lies in the creation of a universal toolkit designed to optimize the selection of vehicles for both individual users and corporate fleets, aiming to minimize the total cost of ownership.

Keywords: electric vehicle, urban operation, selection criteria, integral indicator, multi-criteria analysis method, energy efficiency, specific energy consumption.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток транспортної системи в поєднанні з наростаючими екологічними викликами зумовлює потребу переходу від традиційних автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння до «чистих» технологій, зокрема електромобілів. Електромобілі (ЕМ) сприймаються як ключовий напрям сталого розвитку транспорту, оскільки вони мають потенціал зменшення викидів CO₂, зниження шумового забруднення та зниження залежності від викопного палива [15; 7]. Глобальні тенденції свідчать про стрімке зростання ринку електромобілів: у 2024 році кількість проданих електрокарів перевищила 17 мільйонів одиниць, що склало понад 20 % від загального обсягу продажів нових легкових автомобілів [9]. На кінець 2024 року загальний парк електромобілів у світі налічував майже 58 мільйонів одиниць [9]. Водночас в Україні спостерігається значне зростання кількості електромобілів попри інфраструктурні виклики. На 1 жовтня 2023 року було зареєстровано 70 811 електромобілів (нових та імпортованих) [11]. За підсумками 2024 року загальний обсяг сегмента електромобілів в Україні становив 77,5 тисяч одиниць, що на 44,6 % більше, ніж роком раніше [8]. У 2024 році до України ввезли рекордні 20 785 електромобілів, що у 2,1 рази більше порівняно з аналогічним періодом 2023 року [14]. На середину 2025 року кількість електромобілів в Україні уже перевищила 160 тисяч одиниць [8]. Такі статистичні дані демонструють, що навіть за умов обмежень – недостатньо розвинена зарядна інфраструктура, нерівномірний доступ до мереж електроживлення, високі початкові витрати – електромобілі поступово стають більш поширеними серед населення. Проте цей тренд породжує

складне питання: який електромобіль вибрати для їзди на невеликі відстані? Специфіка щоденного використання в межах міста або передмістя накладає низку обмежень та вимог:

- Запас ходу повинен бути достатнім для щоденних маршрутів (50–150 км).
- Інфраструктура: можливість заряджати автомобіль у домашніх умовах або на доступній мережі – критична для зручності експлуатації.
- Економіка: придбання та експлуатація мають залишатись фінансово прийнятними.
- Експлуатація: надійність, безпека, комфорт та технічне обслуговування – важливі фактори вибору.

Важливим аспектом є врахування реальних умов експлуатації та специфіки керування технічними системами. Як було встановлено у попередніх дослідженнях за участі автора, на ефективність транспортних засобів критично впливають як дорожні умови (мікропрофіль покриття) [17], так і досконалість алгоритмів керування робочим обладнанням [6]. Хоча ці дослідження стосувались комерційного транспорту, виявлені закономірності щодо надійності та оптимізації керування залишаються актуальними й для електромобілів, особливо в контексті збереження енергоресурсу батареї. Тому екологічні показники залишаються важливими лише за умови, що технічні критерії задоволені [15].

В умовах України ці критерії набувають особливого значення через нерівномірний розподіл зарядних станцій, нестабільне електропостачання, а також фінансові обмеження серед потенційних користувачів. Відтак виникає наукова та практична проблема: необхідність системного аналізу та ранжування критеріїв вибору електромобіля для

локального використання з урахуванням технічних, економічних і соціально-екологічних умов, з метою обґрунтування оптимального рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання ефективності впровадження електромобілів широко висвітлено у сучасній науковій літературі. Аналіз праць [18; 20] показує, що домінуючими факторами вибору електромобіля для локальних поїздок є технічні характеристики (запас ходу, ємність батареї) та економічна доцільність. Більшість користувачів у міських агломераціях розглядають електромобілі із запасом ходу від 100 до 300 км як достатні для покриття середньодобового пробігу, що нівелює так звану тривожність щодо запасу ходу (range anxiety) [18].

Суттєву увагу дослідники приділяють економічній складовій. Як свідчать дані аналітичних звітів 2024 року, хоча початкова вартість електромобіля залишається вищою за аналоги з ДВЗ, повна вартість володіння (Total Cost of Ownership — TCO) за 5-річний цикл експлуатації для електромобілів є нижчою за рахунок економії на паливі та технічному обслуговуванні [12; 20]. Однак, як зазначено у працях [12], структура витрат суттєво залежить від регіональних тарифів на електроенергію та інтенсивності використання авто.

Соціально-інфраструктурні аспекти також критичні. Дослідження підтверджують пряму кореляцію між наявністю власної зарядної точки (вдома або на роботі) та готовністю придбати електромобіль [13]. Розвиток публічної зарядної інфраструктури та державна політика стимулювання (субсидії, податкові пільги) залишаються потужними драйверами ринку, особливо для споживачів, які не мають приватних гаражів [5].

Для прийняття рішень щодо вибору конкретної моделі в науковій практиці дедалі частіше застосовують методи багатокритеріального аналізу (MCDM). Огляд літератури [5] свідчить про ефективність застосування таких методів для ранжування складних технічних систем. Проте більшість наявних методик орієнтовані на глобальні ринки (США, ЄС) і не враховують специфіку українського ринку вживаних електромобілів та локальні особливості інфраструктури. Це зумовлює необхідність розробки адаптованої методики оцінювання придатності електромобілів для умов України.

Постановка завдання. Аналіз наявних підходів свідчить про відсутність універсальної методики, яка б дозволяла комплексно оцінити придатність електромобіля саме для локальної

експлуатації в умовах України, поєднуючи технічні характеристики з економічними показниками та енергоефективністю. У зв'язку з цим, метою дослідження є обґрунтування та розробка методики комплексного оцінювання електромобілів на основі розрахунку інтегрального показника якості, що дозволяє ранжувати транспортні засоби за сукупністю різнорідних критеріїв (технічних, економічних, ергономічних) для прийняття оптимальних експлуатаційних рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі науково-прикладні завдання:

Здійснити вибірку репрезентативних моделей електромобілів, що займають найбільшу частку на ринку України (Nissan Leaf, Renault Zoe, Tesla Model 3 та ін.), для проведення порівняльного аналізу.

Сформулювати систему одиничних показників якості (критеріїв), які є критичними для міського циклу експлуатації, включивши до неї: запас ходу, повну вартість володіння (TCO), питому витрату електроенергії, динамічні характеристики та час відновлення заряду.

Розробити математичну модель розрахунку інтегрального показника, застосувавши метод нормалізації різнорідних параметрів (метод «min-max») та обґрунтувати вагові коефіцієнти значущості кожного критерію для умов локальних поїздок.

Виконати розрахунок та побудувати рейтингову гістограму придатності досліджуваних моделей електромобілів, проаналізувати отримані результати та визначити сфери найефективнішого використання кожного класу автомобілів.

Виклад основного матеріалу. Аналіз критеріїв вибору електромобіля для поїздок на невеликій відстані в Україні дозволив виділити ключові чинники, що детермінують рішення споживача. З урахуванням специфіки умов в Україні (стан доріг, тарифи, інфраструктура) та вимог до економічності, базовий перелік критеріїв було розширено показником енергоефективності.

Для комплексного аналізу прийнято систему із семи критеріїв із відповідними ваговими коефіцієнтами (k_i), визначеними методом експертних оцінок:

1. Вартість придбання ($k_1 = 0,25$). Фінансова доступність є домінуючим фактором в умовах обмеженої купівельної спроможності населення. Висока ціна є основним бар'єром для масового переходу на електротягу [9; 11; 15].

2. Енергоефективність ($k_2 = 0,15$). Питома витрата електроенергії (кВт·год/100 км). Цей показник прямо впливає на змінну складову

експлуатаційних витрат і стає критичним при зростанні тарифів на електроенергію [5; 10].

3. Вартість експлуатації ($k_3 = 0,15$). Охоплює витрати на технічне обслуговування (ТО), заміну витратних матеріалів та поточний ремонт. Електромобілі загалом демонструють нижчі витрати порівняно з авто з ДВЗ, однак вартість нормо-години та запчастин різняться залежно від бренду [20; 12].

4. Комфорт і зручність заряджання ($k_4 = 0,15$). Визначається швидкістю приймання заряду бортовим чарджером (AC/DC) та сумісністю з наявною інфраструктурою (порти Type 2, CCS, CHAdeMO). Для України це актуально через нерівномірність покриття швидкісними станціями [4; 12; 14].

5. Запас ходу ($k_5 = 0,15$). Для міського циклу (50–100 км/день) цей критерій має меншу вагу, ніж для магістральних перевезень, проте залишається важливим психологічним фактором («range anxiety») та резервом для зимової експлуатації [8; 18; 19].

6. Технічна надійність ($k_6 = 0,10$). Враховує безвідмовність електронних систем, деградацію батареї та витривалість ходової частини. Як зазначено у працях [6; 17], умови експлуатації (мікропрофіль доріг) суттєво впливають на довговічність транспортних засобів.

7. Екологічність ($k_7 = 0,05$). Оцінка впливу на довкілля, включно з викидами CO_2 при генерації електроенергії для зарядки та можливості утилізації компонентів [2; 7; 13].

Об'єктом дослідження обрано шість моделей, що формують основу парку електромобілів в Україні. Вибір саме цих моделей обумовлений їхньою доступністю на первинному та вторинному ринках, а також популярністю серед користувачів:

- Nissan Leaf (2-ге покоління): поширений електромобіль в Україні завдяки збалансованій ціні та перевіреним конструкції.

- Renault Zoe: типовий представник європейського А-класу, оптимізований для тісних міських умов.

- Volkswagen e-Golf: електрична версія популярного хетчбека, що пропонує звичний рівень комфорту та ергономіки.

- Hyundai Kona Electric: кросовер, що вирізняється високою енергоефективністю та значним запасом ходу.

- Tesla Model 3 / Model Y: технологічні лідери ринку, що пропонують найкращу динаміку та інфраструктуру Supercharger, проте мають вищу вартість.

У табл. 1 наведено узагальнені технічні характеристики вибраних моделей, які стали основою для подальшої бальної оцінки.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики популярних в Україні електромобілів

Table 1. Main technical characteristics of electric vehicles popular in Ukraine

Модель	Запас ходу, км (WLTP)	Потужність, кВт	Ємність батареї, кВт·год	Питома витрата, кВт·год/100 км	Ціна*, тис. євро	Потужність зарядки, кВт	Розгін 0–100 км/год, с
Nissan Leaf	270	110	40	17,1	28	50	7,9
VW e-Golf	230	100	36	15,8	30	40	9,6
Hyundai Kona	305	150	39	14,3	32	75	7,6
Tesla Model 3	491	208	60	14,9	42	170	6,1
Tesla Model Y	455	220	60	15,7	45	170	6,9
Renault Zoe	395	100	52	17,2	27	50	9,5

*Примітка: Ціни вказано усереднені для нових або «свіжих» вживаних авто станом на 2024-2025 рік.

Для отримання об'єктивної оцінки застосовано метод багатокритеріального аналізу з попередньою нормалізацією різнорідних параметрів. Математична модель інтегрального показника якості I для i -ї моделі електромобіля має вигляд адитивної згортки:

$$I_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

де x_{ij} – нормалізоване значення j -го критерію для i -ї моделі (приведене до безрозмірної шкали); k_j – ваговий коефіцієнт j -го критерію ($\sum k_j = 1$).

Оскільки вхідні параметри мають різну розмірність (ціна в євро, пробіг у км, час у секундах)

і різний вектор оптимізації (для запасу ходу – «чим більше, тим краще», для ціни – «чим менше, тим краще»), використано процедуру нормалізації за методом лінійного масштабування (min-max).

Для параметрів із прямою позитивною залежністю (запас ходу, надійність, комфорт, екологічність):

$$x_{ij} = 1 + 9 \cdot \frac{P_{ij} - P_j^{min}}{P_j^{max} - P_j^{min}} \quad (2)$$

де P_{ij} – абсолютне значення параметра; P_j^{min} , P_j^{max} мінімальне та максимальне значення параметра у вибірці.

Для параметрів із зворотною залежністю (ціна, питома витрата енергії, час розгону), де менше значення є кращим:

$$x_{ij} = 1 + 9 \cdot \frac{P_j^{max} - P_{ij}}{P_j^{max} - P_j^{min}} \quad (3)$$

Такий підхід дозволяє привести всі значення до єдиної бальної шкали в діапазоні [1 ...10], де 10 – найкращий результат.

Окрім технічного рейтингу, критичною умовою вибору є економічна доцільність. Розрахунок повної вартості володіння за прогнозований період експлуатації T (років) виконується за формулою:

$$V_{\Sigma} = C_{куп} + \sum_{t=1}^T (C_{ен} + C_{то} + C_{ін}) - C_{зал} \quad (4)$$

де $C_{куп}$ – початкова ціна придбання автомобіля; $C_{ен}$ – річні витрати на електроенергію, що розраховуються як $L \cdot E \cdot тариф$ (L – річний пробіг, E – питома витрата); $C_{то}$ – витрати на технічне обслуговування та ремонт; $C_{ін}$ – інші витрати (страхування, податки, шини); $C_{зал}$ – прогнозована залишкова вартість автомобіля в кінці періоду.

На основі розробленої методики проведено розрахунок інтегральних показників, результати якого зведено в табл. 2.

Для наочного порівняння сильних та слабких сторін лідерів рейтингу та аутсайдерів за цінним фактором побудовано діаграму (рис. 1). Як бачимо з діаграми, модель Renault Zoe має збалансований профіль із зміщенням у бік економічних показників (ціна, енергоефективність), тоді як Tesla Model 3 демонструє максимальні показники в секторі «Комфорт» та «Запас ходу», але значно поступається в секторі «Фінансова доступність». Це візуально підтверджує, що для локальних поїздок (де запас ходу понад 300 км є надлишковим) переплачувати за технічну досконалість нерационально.

Аналіз результатів показує, що для сегменту локальних перевезень оптимальними є моделі Renault Zoe ($I = 7,95$) та Hyundai Kona Electric ($I = 7,90$). Незважаючи на беззаперечну технологічну перевагу моделей Tesla за критеріями запасу ходу та комфорту, їхня висока початкова вартість суттєво знижує інтегральний рейтинг в умовах чутливості ринку до ціни. Hyundai Kona демонструє найкращі показники енергоефективності, що робить її лідером за сукупною вартістю володіння при інтенсивній експлуатації.

Узагальнений рейтинг придатності досліджуваних моделей представлено на гістограмі (рис. 2).

Запропонована методика дозволяє сформулювати умову прийняття позитивного рішення щодо придбання конкретної моделі для коротких поїздок:

$$I_i \geq I_{пор} \quad \text{та} \quad V_{\Sigma i} \leq (1 + \delta) \cdot \bar{V}_{\Sigma} \quad (5)$$

де $I_{пор}$ – порогове значення рейтингу (встановлюється експертно, наприклад, 7,5); \bar{V}_{Σ} – середньоринкова вартість володіння в класі; δ – допустимий допуск (толеранс).

Таблиця 2. Інтегральна оцінка придатності електромобілів для локальної експлуатації

Table 2. Integrated assessment of EV suitability for local operation

Модель	Ціна ($k_1=0,25$)	Енергоеф. ($k_2=0,15$)	Експлу- атація ($k_3=0,15$)	Комфорт ($k_4=0,15$)	Запас ходу ($k_5=0,15$)	Надійність ($k_6=0,10$)	Екологія ($k_7=0,05$)	Інтегральний показник (I)
Renault Zoe	9	8	8	7	7	7	9	7,95
Hyundai Kona	7	10	8	8	8	8	9	7,9
Nissan Leaf	8	7	8	7	6	8	9	7,6
Tesla Model 3	6	9	6	9	9	9	9	7,8
Tesla Model Y	5	8	6	9	10	9	9	7,7
VW e-Golf	8	8	7	7	5	8	9	7,35

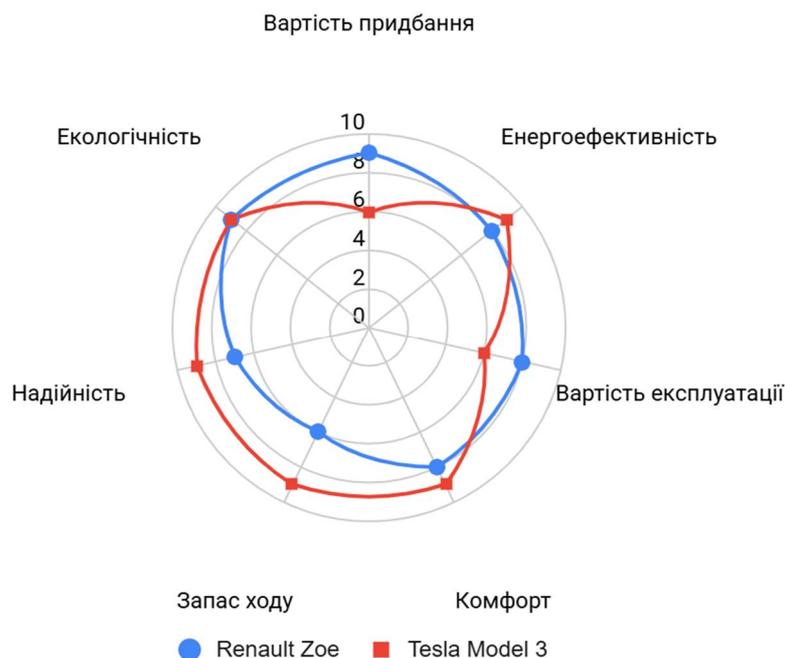


Рис. 1. Профільне порівняння характеристик Renault Zoe та Tesla Model 3 за нормалізованими критеріями
Fig. 1. Profile comparison of Renault Zoe and Tesla Model 3 characteristics by normalized criteria

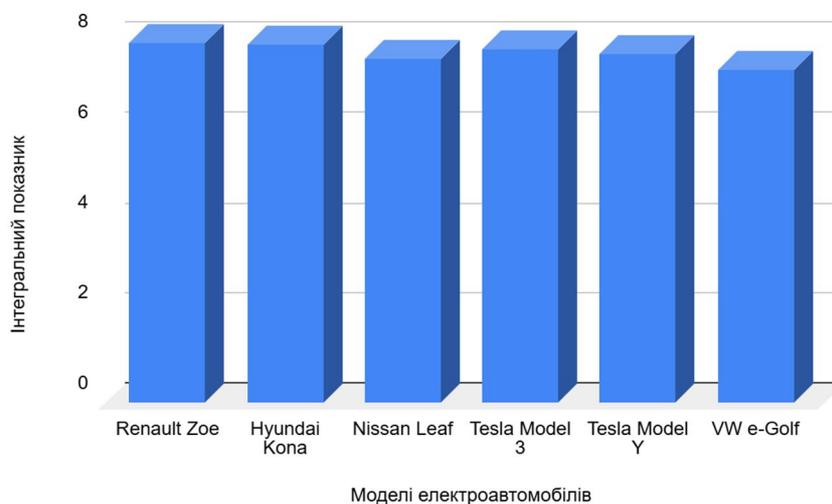


Рис. 2. Рейтинг придатності електромобілів для локальної експлуатації (Інтегральний показник I)
Fig. 2. Suitability rating of electric vehicles for local operation (Integral indicator I)

Додатково перевірено стійкість отриманого рішення до зміни зовнішніх факторів. Змодельовано сценарій зростання вартості електроенергії на 50 % (що є актуальним ризиком для енергосистеми України). У такому разі вага критерію «Енергоефективність» (k_2) експертно підвищується з 0,15 до 0,25 за рахунок зниження ваги «Запасу ходу». Розрахунок показав, що за

такого сценарію лідером рейтингу стає Hyundai Kona Electric ($I = 8,05$), випереджаючи Renault Zoe ($I = 7,90$) завдяки рекордно низькій питомій витраті енергії (14,3 кВт·год/100 км проти 17,2 кВт·год/100 км у Zoe). Це свідчить про те, що в довгостроковій перспективі енергоефективність стає вирішальним фактором економічної доцільності.

Висновки. Удосконалено методичний підхід до багатокритеріального вибору транспортних засобів шляхом інтеграції до системи оцінювання показника «енергоефективність» (питома витрата енергії) та адаптації вагових коефіцієнтів до умов локальної експлуатації в Україні. Це дозволило, на відміну від наявних підходів, змістити фокус оцінювання з технічних максимумів (максимальна швидкість, дальність ходу) на показники економічної ефективності повного життєвого циклу.

Встановлено нелінійну залежність між ринковою вартістю електромобіля та його інтегральною придатністю для коротких поїздок. Доведено, що для міського циклу (до 100 км/добу) пріоритетними є економічні фактори – вартість придбання (ваговий коефіцієнт 0,25) та енергоефективність (0,15), тоді як фактор запасу ходу є другорядним (0,15). Зростання технічних характеристик понад необхідний мінімум (як у випадку з Tesla) призводить до зниження інтегрального показника якості через диспропорційне зростання капітальних витрат.

На основі розробленої моделі визначено, що оптимальним балансом споживчих характеристик для умов України володіють моделі компактного класу: Renault Zoe ($I = 7,95$) та Hyundai Kona Electric ($I = 7,90$). Вони забезпечують мінімізацію повної вартості володіння за достатнього рівня комфорту. Аналіз чутливості моделі показав, що при зростанні тарифів на електроенергію Hyundai Kona виходить на перше місце завдяки кращій енергоефективності (14,3 кВт·год/100 км), що підтверджує критичну важливість цього параметру в довгостроковій перспективі.

Запропонований алгоритм та умова прийняття рішення ($I_i \geq I_{пор}$) є готовим інструментарієм для оптимізації структури автомобільних парків підприємств та служб таксі. Впровадження методики дозволяє знизити ризики помилкового вибору рухомого складу та зменшити прогнозовані експлуатаційні витрати на 15–20 % за рахунок пріоритетизації енергоефективних моделей, а не моделей з надлишковим запасом ходу.

Обмеженням запропонованої методики є використання статичних ринкових цін, які можуть змінюватися під впливом митної політики, а також усереднення показників деградації батареї без урахування індивідуальних стилів керування. Отримана модель є валідною для прийняття рішень у сегменті міського транспорту, але потребує корегування вагових коефіцієнтів при розгляді логістичних або магістральних перевезень.

Бібліографічний список

1. Дзюра В. О. Особливості формування системи технічного сервісу електромобілів в Україні. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 2 (14). С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-34-40>.
2. Єщенко О. О. Проблеми та перспективи утилізації літій-іонних акумуляторів електромобілів в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.263841>.
3. Закон України «Про деякі питання ввезення на митну територію України та проведення першої державної реєстрації транспортних засобів». *Відомості Верховної Ради України*. 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2754-19> (дата звернення: 05.02.2025).
4. Клименко О. М. Екологічна безпека автотранспортних потоків та перспективи електромобілізації міст України. *Екологічна безпека та природокористування*. 2021. Вип. 3 (39). С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.45-52>.
5. Матейчик В. П., Сміхула А. В., Садковий В. П. Визначення енергетичної ефективності електромобіля в умовах міського циклу руху. *Автомобільний транспорт*. 2018. Вип. 42. С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.27>.
6. Обґрунтування способу керування маніпуляторними установками вантажних автомобілів / О. Сукач, Я. Габрієль, В. Шевчук, С. Хімка та ін. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.035>.
7. Полив'ячук А. П. Оцінка екологічної ефективності експлуатації електромобілів в умовах міського руху. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2020. Вип. 89. С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.89.0.62>.
8. Рекордний імпорт електрокарів: як змінився ринок у 2024 році. *OpenDatabot*: аналітична платформа. 2024. URL: <https://opendatabot.ua/analytics/ev-import-2024> (дата звернення: 05.02.2025).
9. Ринок електромобілів в Україні: аналітика та тренди 2023 року. *Інститут досліджень автोरинку*. URL: <https://eauto.org.ua/statistics/2023> (дата звернення: 05.02.2025).
10. Сахно В. П., Поляков В. М. Дослідження експлуатаційних властивостей електромобілів в умовах низьких температур. *Вісник Національного транспортного університету*. 2019. Вип. 44. С. 258–265. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/44/258-265.pdf> (дата звернення: 05.02.2025).
11. Статистика реєстрацій електромобілів в Україні (BEV). Офіційний сайт асоціації «Укравтопром». URL: <https://ukravtoprom.com.ua/> (дата звернення: 05.02.2025).

12. Al-Ghamdi A. M. Electric Vehicle Adoption: A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No 8. P. 375. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj15080375>.
13. Ecer F. An extended MCDM framework for the assessment of battery electric vehicles in the era of smart mobility. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. Art. 106883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106883>.
14. Gatton A. Electric Vehicles: The Future of Transport and the Challenge of Infrastructure. *Journal of Sustainable Mobility*. 2023. Vol. 12, No 3. P. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2023.04.012>.
15. Global EV Outlook 2024. Moving towards a stronger EV market / International Energy Agency (IEA). Paris, 2024. 165 p. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (дата звернення: 05.02.2025).
16. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag, 1981. 259 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
17. Identifying the influence of micro profile of rural roads on the durability of bus body when carrying passengers / D. Ruban, L. Krainyk, H. Ruban, S. Khimka, O. Sukach et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1, No 7 (133). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325773>.
18. Liao F., Molin E., van Wee B. Consumer preferences for electric vehicles: a literature review. *Transport Reviews*. 2017. Vol. 37, No 3. P. 252–275. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1230794>.
19. Saaty T. L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, No 1. P. 83–98. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
20. Vincentric 2024 US Electric Vehicle Cost of Ownership Analysis. *Vincentric LLC*. April 2024. URL: <https://vincentric.com/Home/Industry-Reports> (дата звернення: 05.02.2025).

Стаття надійшла 07.02.2025

WIND TURBINES AND FARMS USING AI FOR ENERGY STORAGE

Patryk Radek¹, mgr inż., Grzegorz Wałowski², DSc,

¹*Department of Optoelectronics, Faculty of Electrical Engineering, Silesian University of Technology, 2A Akademicka Street, 44-100 Gliwice, Poland,*

²*Institute of Technology and Life Sciences, National Research Institute, Falenty, Al. Hrabaska 3, 05-090 Raszyn, Poland, e-mail: walowski.g@gmail.com*

Serhiy Syrotyuk³, Ph.D., Volodymyr Halchak³, Ph.D., Taras Stanytskyi³, mgr, Hanna Syrotyuk³, Ph.D.

³*Lviv National Environmental University, V. Velykoho Str. 1, Lviv-Dubliany, Ukraine*

e-mail: ssyr@ykr.net; halchak@ukr.net, stanytskyito@lnup.edu.ua

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.87-93>

Radek P., Wałowski G., Syrotyuk S., Halchak V., Stanytskyi T., Syrotyuk H. Wind turbines and farms using AI for energy storage

The article provides a comprehensive overview of wind turbine technologies, including both onshore and offshore systems, focusing on aspects such as grid integration, trends in the levelized cost of energy (LCOE), and applications of artificial intelligence (AI) in areas like forecasting, diagnostics, control, and digital twins from 2015 to 2025. The importance of energy storage solutions, such as battery energy storage system (BESS), liquid air energy storage (LAES), compressed air energy storage (CAES), power-to-x/H₂ (P2X/H₂), and pumped storage, is also discussed in relation to enhancing system flexibility and increasing the market value of wind energy. The text identifies research gaps and priorities for research and development. Wind energy remains cost-competitive, with onshore wind continuing to be among the lowest cost options for new energy capacity (weighted LCOE \approx \$0.034/kWh globally). Cost variations are mainly influenced by capacity factor (CF), the weighted average cost of capital (WACC), and execution risks. The scale of capacity and maturity of the supply chain are improving, particularly for offshore wind (12–20+ MW/turbine). However, costs and timelines are sensitive to logistics, weather conditions, and the availability of installation vessels. High-voltage direct current (HVDC) technology is becoming the standard for exporting offshore power, and transitioning to meshed/multi-terminal systems require interoperability across different vendors (InterOPERA) and standardized FAT/SAT/HIL testing. Ensuring grid-forming capabilities and converter compatibility is essential for the stability of low-inertia power systems, necessitating harmonized testing profiles and certification requirements at the wind turbine generator (WTG)/wind power plant (WPP)/HVDC levels. Artificial intelligence is increasingly being utilized in operations, achieving optimal results by combining forecasting methods (long short-term memory networks (LSTM)/ gated recurrent units (GRU)/Transformers) with fault detection and diagnosis (FDD)/ remaining useful life (RUL) predictions and wake steering techniques. These results are measured not only by the change in annual energy production but also by their impact on service profiles and network constraints.

Current and evolving ENTSO-E requirements include fault ride-through capabilities (low-voltage ride-through (LVRT) and high-voltage ride-through (HVRT)), active power (P) and reactive power (Q) control (Volt-VAR/Volt-Watt), ramp-rate constraints, primary and secondary frequency control (FCR/FRR), as well as limits on harmonics, flicker, and distortion. Converter-based generation units must ensure low short-circuit power (weak grid) and during disturbances, highlighting the increasing significance of dynamic models (root-mean-square simulation (RMS)/electromagnetic transient simulation (EMT)) and compliance validation during both commissioning and operation.

Keywords: renewable energy, wind turbines, offshore, AI/ML, forecasting, diagnostics, digital twin, wake control, BESS, hydrogen, LCOE, HVDC.

Радек П., Валовський Г., Сиротюк С., Гальчак В., Станицький Т., Сиротюк Г. Вітрові турбіни та вітроелектростанції з використанням штучного інтелекту для накопичення енергії

Подано узагальнений аналітичний огляд розвитку вітроенергетичних технологій у період 2015–2025 рр., що охоплює наземні та морські вітроустановки, питання їх інтеграції в електричні мережі, динаміку показника приведеної вартості електроенергії протягом життєвого циклу (LCOE), а також застосування методів штучного інтелекту. Особливу увагу приділено використанню ШІ для прогнозування генерації, технічної діагностики, оптимізації керування та створення цифрових двійників вітрових електростанцій.

Розглянуто роль систем накопичення енергії (BESS, LAES, CAES, P2X/водень, гідроакумуляуючі електростанції) у підвищенні гнучкості енергосистем та зростанні ринкової цінності вітрової генерації. Визначено основні наукові прогалини та пріоритети науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи, зокрема в частині інтеграції відновлюваних джерел енергії, до енергосистем із низькою інерційністю.

Економічна конкурентоспроможність вітроенергетики зберігається: наземна вітроенергетика залишається серед найдешевших джерел нових генеруючих потужностей (середньозважений LCOE \approx 0,034 дол./кВт·год у глобальному

масштабі). Діапазон вартостей визначається переважно коефіцієнтом використання встановленої потужності (CF), вартістю капіталу (WACC) та ризиками реалізації проєктів. Масштабування потужностей і зрілість ланцюгів постачання зростають, особливо в офшорному сегменті (12–20+ МВт на турбіну), однак строки та витрати залишаються чутливими до логістики, погодних «вікон» і доступності спеціалізованих монтажних суден.

Передача потужності від морських ВЕС дедалі частіше базується на технології HVDC; перехід до багатовузлових і мережових рішень потребує міжвендорної сумісності та стандартизованих випробувань FAT/SAT/HIL. В умовах низької інерційності мереж ключового значення набувають grid-forming перетворювачі та узгоджені вимоги сертифікації. Найкращі результати впровадження ІІІ в експлуатації досягаються при поєднанні прогнозування (LSTM/GRU/Transformer), діагностики несправностей і залишкового ресурсу (RUL), а також керування вітровими шлейфами з урахуванням впливу на АЕР, сервісні режими та мережеві обмеження.

Актуальні та перспективні вимоги ENTSO-E охоплюють здатність до роботи при аваріях (LVRT/HVRT), керування активною та реактивною потужністю, обмеження швидкості зміни потужності, первинне й вторинне регулювання частоти, а також нормативи гармонік і флікера. Для генераторів на базі перетворювачів зростає значення динамічного моделювання (RMS/EMT) і перевірки відповідності під час пусконаладження та експлуатації.

Ключові слова: відновлювана енергетика, вітрові турбіни, офшорна вітроенергетика, штучний інтелект / машинне навчання, прогнозування, діагностика, цифровий двійник, керування вітровим слідом, системи накопичення енергії, водень, LCOE, HVDC.

Problem statement. Wind energy maintains high growth dynamics and has exceeded the threshold of ~1 TW of installed capacity; 2023 will bring approximately 117 GW of new installations, as confirmed by industry reports and agency services [7; 20]. Initial estimates and market updates indicate that the trend of high growth has continued into 2024, although it still remains below the level necessary to achieve the ambition of tripling renewable energy capacity by 2030 [7; 19].

In parallel, cost reviews and techno-economic benchmarks show that wind remains cost-competitive with new conventional capacity: the International Renewable Energy Agency (IRENA) report documents falling capital costs and low LCOE values for onshore wind, with some variations due to the cost of capital and supply chains [4]. Independent analyses by Lazard (LCOE+ 2024/2025) place onshore wind at the lower end of the cost spectrum of generation technologies on a subsidy-free basis [11; 12]. The National Renewable Energy Laboratory (NREL) Annual Technology Baseline 2024 parameterizations (cost profiles, capacity utilization factors, O&M) remain the primary reference point for projections to 2050 – both in the utility-scale and distributed wind scenarios [13; 14; 16; 17].

In 2024–2025, system bottlenecks (permits, grid access, stability of support mechanisms) and financing conditions (WACC) will come to the fore. As the share of weather-dependent sources increases, so does the market value of flexibility: balancing services (FCR/FRR), reactive power regulation capacity, and integration with energy storage, which reduce curtailment and smooth the generation profile [4; 5; 13]. The maturity of battery technologies and advances in safety, degradation, and life-cycle cost (LCOS) are confirmed by the latest scorecards and operational evaluations [4; 15]. As a result, wind + storage

hybridization improves project bankability and facilitates meeting grid code requirements in systems with decreasing inertia and increasing converter share [5; 13; 15].

Analysis of recent research and publications.

Architectures and capacity scale. HAWTs (horizontal axis turbines) dominate the wind energy market, while VAWTs (vertical axis turbines) remain niche and demonstrative – mainly due to aerodynamics, scale, and supply chain maturity [7; 13; 17]. In the onshore class, typical unit capacities have grown from ~2–3 MW to 5–7 MW between 2015 and 2025, and in the offshore class from ~6–8 MW to 12–20+ MW thanks to larger rotor diameters, taller towers, and better load control [7; 13; 17; 18].

Two main generator configurations are used, namely direct-drive (usually PM, fewer moving parts, higher nacelle mass) and geared (lighter generator, but complex gearbox loaded with variable wind profiles). The choice influences the efficiency curve, O&M strategy, and reliability profile (bearings/gears vs. multi-pole—new generator) [13; 17]. Both approaches standardize on active pitch and yaw systems, integrated with load sensors and SCADA data, enabling advanced load control and AEP (also under "wake control") [13; 21; 22].

The trend is toward increasing rotor diameter and the use of hybrid composites (glass/carbon) and joining technologies for very long offshore blades (transport/installation). Tower heights are increasing (onshore) to take advantage of better wind profiles and reduce ground-level phenomena [7; 13; 17].

Onshore, the standard foundations include reinforced concrete options, either monolithic or segmented, as well as geotechnically adapted foundations. Project development is increasingly moving towards areas that

accommodate taller towers and longer blades, while also navigating environmental and spatial restrictions [7; 13]. In shallow or temperate waters, permanent foundations are prevalent, with monopiles (diameter increasing to class XL) and jackets being commonly used. For deeper waters, the adoption of floating platforms such as spar buoys, semisub, and tension-leg platforms (TLP) is on the rise. Market and technical reports suggest a rapid increase in power unit capacity, which necessitates the use of heavy installation equipment and the standardization of offshore interfaces [7; 18]. Additionally, within the internal grid of the farm, the voltage of array cables is increasing to 66 kV, compared to the previous 33 kV, thereby reducing losses and the number of distribution bays [18].

For long distances and increasing offshore export capacity, HVDC (VSC) is being used, which improves controllability, reactive power balance, and stability in systems with decreasing inertia. Horizon 2025+ encompasses multi-terminal/meshed HVDC projects at sea (North Sea/Baltic Sea), requiring multi-vendor interoperability (frameworks and standards developed, among others, in InterOPERA) [6; 10; 18]. On the system side, ENTSO-E emphasizes research and implementation of grid-forming and compatibility in converter-dominated networks [5]. At the farm level, turbine coordination is used (curtailment, P/Q control, FCR/FRR support), and in recent years – thanks to jet models and operational data – wake steering (yaw/pitch deflection) has become common practice to increase AEP and reduce load. These methods are described and quantified in the NREL/WES literature [21; 22]. High-frequency SCADA streams and vibration/temperature sensors are standard, powering diagnostics, production forecasting, and digital twins. The datasets and cost/CF parameterizations in NREL ATB 2024 provide a reference for modeling LCOE/NPV/IRR scenarios for various configurations (onshore/offshore fixed/floating) [13; 17].

From 2015 to 2025, wind power has seen significant growth in turbine scale, with onshore capacities reaching 5–7 MW and offshore turbines 12–20+ MW, along with larger rotor diameters [7; 13; 17; 18]. The share of HVDC transmission is increasing, with preparations for multi-terminal and meshed networks requiring interoperability standards [6; 8; 10]. Wind farm infrastructure is being modernized to 66 kV, improving power quality and controllability (P/Q) [18], while integrated farm and wake control strategies (AEP↑, loads↓) [21; 22] enhance energy production and reduce mechanical loads. Reference data and models, such as ATB 2024, provide a foundation for techno-economic analyses and investment planning [13; 17].

Setting the task. Current and evolving ENTSO-E requirements include fault-ride-through (LVRT/HVRT), P/Q control (Volt-VAR/Volt-Watt), ramp-rate constraints, primary and secondary frequency control (FCR/FRR), as well as harmonic, flicker, and distortion limits. Converter-based generating units must maintain low short-circuit power (weak grids) and under disturbance conditions, which increases the importance of dynamic models (RMS/EMT) and compliance validation during commissioning and operation [5; 8].

As export power and distances from shore increase, the share of HVDC (VSC/MMC) increases, providing independent active/reactive power control, improved stability in systems with decreasing inertia, and reduced losses on long routes. Internal farm networks are being upgraded from 33 kV to 66 kV, resulting in reduced losses and fewer distribution bays. Market reports also point to the need for standardization of maritime interfaces and coordination with transmission grid operators [18; 21]. In the North Sea and Baltic Sea regions, the concept of meshed/multi-terminal HVDC with multi-node and multi-vendor connections is being developed. A key issue is multi-vendor interoperability (control compatibility, DC protection, communication standards, and FAT/SAT testing), which is addressed, among others, by the InterOPERA program (technical framework, specifications, verification procedures) [6; 10].

To ensure frequency and voltage stability in a converter-dominated system, TSOs/DSOs and offshore grid operators expect grid-forming capabilities: converter operation as a "voltage source" (VSM/droop/matching control), synchronization without relying solely on PLLs, provision of short-circuit power, black starts, and immunity to interactions with other converters and HVDC. ENTSO-E identifies this as a research and implementation priority for 2024–2034 [5], and offshore integration reviews provide practical implications for the selection of control, filtering, and coordination with HVDC [17].

A modern farm control unit implements transmission system operator commands (AGC/availability), distributes P/Q references to turbines, enforces ramp-rate and power factor PF profiles, and manages curtailment and network constraints (voltage, cable currents, transformer thermals). In practice, wind farms increasingly provide system services – from frequency regulation to voltage support – and acceptance test requirements include both RMS and EMT scenarios (fast disturbances, harmonics, converter-HVDC interactions) [5; 8; 18].

A large share of converters requires: designing filtration and resonance damping (cables, transformers, filters); scanning impedance at the load (current path

stability for harmonics); coordination of P/Q control algorithms between turbines, the farm, and HVDC terminals to avoid oscillations and uncontrolled reactive power flows [5; 8; 18]. Integrating BESS/LDES at the farm's coupling point increases flexibility, enabling FCR/FRR, fast-frequency response, ramp smoothing, power profile firming, and curtailment reduction. Operational evaluations and scorecards confirm the possibility of stable provision of such services with proper management of degradation and the temperature profile of the storage system [15]. The model benefits and parameterization for long-term scenarios are well described in the NREL ATB 2024 reference sets [13].

Farm-to-grid integration is entering a stage where grid-forming capabilities and HVDC interoperability are becoming as critical as classic FRT requirements and P/Q control. For offshore projects, with power scaling and increasing distances, HVDC is the default solution, and for the EU market, it is a prerequisite for constructing meshed offshore grids. Onshore and offshore, plant-level control and (increasingly often) energy storage facilities determine the ability to provide ancillary services, which enhances project bankability and system stability [5; 6; 8; 10; 13; 15; 18].

Presentation of the main material. AI/ML is key in four areas: wind and production forecasting (nowcasting 5–30 min, short-term 1–48 h, medium-term up to 7 days); fault diagnosis and component RUL estimation from SCADA/vibration/thermal data; digital twins (drivetrain, blades, pitch/yaw systems); farm-level control – including wake steering and coordination of active/reactive power and grid constraints (often in model predictive control (MPC)/reinforcement learning (RL) schemes and taking into account operational constraints) [8; 18; 21; 22].

In practice, SCADA series (P , Q , v_{wind} , ρ , θ_{yaw} , T_{nacelle}), meteorological data (stations/lidars, NWP), qualitative signals (curtailment, alarms), and calendar features are combined. Models: from "classic" (GBM, RF) through LSTM/GRU to Transformers (temporal encoders, attention with NWP data), often in hybrid systems (nowcast \rightarrow short-term cascades) [1; 23]. Validation: serial (walk-forward), without time leakage; MAE/RMSE/nMAE metrics, for probabilistic versions: pinball loss, CRPS, quantile calibration. Reviews from 2024–2025 confirm that the benefits of sequential models increase with data density and quality (SCADA + NWP), and that local features (layout/wake) and ensembling provide advantages [1; 23]. FDD (Fault Detection & Diagnosis) utilizes SCADA features (bearing/gear temperature trends, slip, vibration,

currents) and supervised and unsupervised learning methods (classification/anomaly). RUL relies on sequential or Bayesian models, with forecast uncertainty and decision costs (maintenance planning vs. failure risk). Although the review literature focuses primarily on power forecasting, the same ML framework is being transferred to diagnostics; NREL reports identify O&M digitization as one of the pillars of LCOE reduction [1; 18].

Digital twins (DT) combine physical models (aerodynamics/structure) with data models (ML) and SCADA/vibration streams, enabling load estimation, drift detection, and real-time parameter updates (so-called "physics-ML hybrids"). Market and integration reports for offshore applications note accelerated digitalization, which supports service planning and operations in decreasing inertia networks [8; 18]. Wake steering – yaw/pitch coordination at the farm level minimizes wake losses and - with weather/layout data – allows for increased AEP when controlling blade and gearbox loads. NREL market research and studies, as well as WES publications, demonstrate that wake steering has significant value potential in the US energy markets and is a candidate for an operational standard for modern wind farms [21; 22]. In real-world implementations, algorithms must respect grid codes (ramp-rate limits, volt-variable, and frequency-of-transfer (FRT)) and interoperability with HVDC (offshore). Therefore, in practice, MPC with constraints and/or RL policies trained on EMT/RMS simulators are used, followed by safety rules and operator supervision [5; 8; 18].

Data pipeline and machine learning operations (MLOps) (implementation practice): data ingest and quality: SCADA standardization, outlier detection, gap-filling, dataset versioning; feature store and experiments: feature engineering automation, experiment tracking, and distribution drift validation (data/model drift); model risk and interpretability: SHAP/Permutation for array models; for sequences - time window analysis (saliency) and counterfactual testing; operation: online metric monitoring (nMAE, CRPS), degradation alarms, periodic retraining, and compliance auditing. This framework is consistent with the integration trends (TSO requirements, P/Q control quality, HVDC operation) described by ENTSO-E and NREL [5; 8; 18].

Key challenges include: data availability and standardization (making SCA-DA available for benchmarking – Table), generalization across farms (transfer learning), integration with grid and HVDC codes, and co-optimization with storage facilities (firming/provisioning FCR/FRR), as confirmed by

integration reports and storage facility performance assessments [5; 8; 13; 15].

NREL research indicates that wake steering can increase energy yield and reduce land occupancy by as much as to several dozen percent, depending on the location and market [6; 10; 20].

In practice, three main variants are encountered: co-located (the storage facility and the wind farm share a connection), behind-the-meter (ESS "behind the meter" of the wind farm, with full control coordination), and front-of-the-meter (ESS as an independent resource at the same grid node). Each option differs in billing rules,

connection constraints, and service mix (energy + FCR/FRR/FFR, voltage regulation, black-start) [13; 15].

Value added and system services. Wind + ESS hybridization: smoothes the power profile and reduces curtailment/wind-spillage; enables the provision of frequency containment reserve (FCR)/ frequency restoration reserve (FRR)/ fast frequency response (FFR), voltage services, and daily arbitrage; improves bankability (reduced revenue risks, better alignment with grid codes), which is reflected in LCOE/LCOS analyses and market scenarios (Lazard, NREL ATB; operational evaluations) [11; 13; 15].

Table. List of typical tasks and metrics [own work]

Таблиця. Перелік типових завдань і показників оцінювання [власна розробка]

AI Task	Input Data	Horizon	Models	Metrics	Notes/SOTA
Power forecast	SCADA, meteo, lidar	15 min–48 h	LSTM/GRU, Transformer	MAE/RMSE/nMAE	Transformers, hybrid MTL
Fault Detection	SCADA, Vibration, Temperature	Continuous	Autoencodery, CNN, XGBoost	F1/AUC	Explainable AI for Alarms
Component RUL	Running times, workloads	Days–months	Bayes, RNN, survival	MAPE, Brier	Models with uncertainty
Wake control	Wind roses, layout	Online	MPC/RL + FLORIS	Δ AEP, obgravity	Increased AEP, reduced workload

Storage technologies – status and parameters: BESS (Li-ion/LFP; ascending Na-ion): mature supply chains, fast response (ms–s), typical times 0.5–4 h; impact on LCOS determined by C-rate, temperature, cycle depth, and aging profiles. DNV reports and New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) evaluations provide current observations on degradation, safety, and operational efficiency [4; 15]; LAES / CAES (LDES): longer times (multiple hours/day), no electrochemical degradation, but lower η round-trip; literature reviews present efficiency ranges, TRL status, and design bottlenecks [2; 3]; PHS (Pumped-Storage Hydropower): bulk resource, high power, proven reliability; design-dependent costs and location considerations [9; 13]; P2X/H₂: conversion of wind surpluses to hydrogen (electrolysis) and further use (ammonia, heat, mobility or el-el recombination via fuel cells/GT). Provides cross-sectoral flexibility at the expense of lower el-el cycle efficiency; system and cost approaches are discussed in cost and scenario reports [9; 13].

Typical ranges (indicative, according to reviews and reports): BESS Li-ion/LFP: η ~ 85–92 %, ms–s response, 4–10,000 cycle life (depending on profile); decreasing costs, but sensitive to WACC and BoS [4; 11; 13; 15]; LAES: η ~ 55–70 %, 1-minute response,

high mechanical durability; attractive for LDES and cold climates [2; 3]; CAES/AA-CAES: η ~ 45–70 % (higher for adiabatic concepts), 1-minute horizon; geological requirements or cost of pressure storage [2; 13]; PHS: η ~ 70–85 %, s–min response, very high durability; location constraints [9; 13]. For wind farms, the most commonly considered are BESS 1–2 h (firming, FCR/FRR) and LDES 6–12 h (LAES/CAES/PHS – trough/peak shift; daily-seasonal integration). The heuristic: $E_{ESS} = P_{ESS} \times t_{duration}$, and P_{ESS} is selected based on the analysis of the ramp distribution and the farm's "curtailment" profile (SCADA + NWP) [13; 15].

Control and mixed-integer programming (MIP)/MPC include: SoC management (system service slots vs. arbitration); respecting ramp-rate limits, P/Q, and connection constraints; coordination with the HVDC (offshore) and WPP controller of the farm, usually implemented by MPC (with constraints) or MIP/rule-based schedules supported by prediction (SCADA + NWP). In practice, operational supervision (degradation, temperature, BMS) and "derating" of services are necessary to maintain the guarantee [13; 15; 18].

The location of the storage (behind/before the meter) determines the allocation of losses and revenues

(energy vs. ancillary services). In offshore, the integration of ESS ↔ HVDC and 66 kV voltages in in-farm cables is growing in importance, requiring consistency between P/Q algorithms and constraint mechanisms (cable/transformer thermal management) [8; 18].

Operational reports (NYSERDA) and industry assessments (DNV) emphasize requirements for fire safety, gas detection, fire insulation, emergency discharge strategies, and compliance (acceptance testing, monitoring) – key for operator/insurer acceptance [4; 15].

The LCOE of wind energy and the LCOS of storage systems together form a value stack: arbitrage, ancillary services, penalty reduction/curtailment, and incentivized delivery profiles (PPA/service markets). Lazard and NREL ATB indicate that profitability depends on WACC, service prices (FCR/FRR), grid tariffs, and the expected operating profile (number of cycles) [11; 13].

From a risk perspective, key factors include performance guarantees (calendar and cyclical), degradation (temperature/C-rate), parts availability, and, in offshore applications, service logistics and integration with HVDC. Operational evaluations (NYSERDA) provide empirical performance and availability indicators for ESS fleets, making financial models realistic [15].

Conclusions. The cost competitiveness of wind energy continues to be strong. Onshore wind remains in the lower cost range for new capacity (weighted LCOE ≈ \$0.034/kWh globally). The cost is primarily influenced by CF, WACC, and execution risks. Capacity scale and supply chain maturity are improving, especially for offshore wind (12-20+ MW/turbine). However, costs and project timelines are sensitive to factors such as logistics, weather conditions, and the availability of installation vessels. HVDC is becoming the standard method for exporting offshore power, and the shift to meshed/multi-terminal systems requires interoperability among various vendors (InterOPERA) and standardized FAT/SAT/HIL testing. To ensure the stability of low-inertia systems, it is essential to maintain compatibility between grid-forming technologies and converters. Harmonized testing profiles and certification requirements at the WTG/WPP/HVDC levels must be established. AI is now being integrated into operations, achieving the best results when combining forecasting methods (such as LSTM/GRU/Transformers) with FDD/RUL assessments and wake steering techniques. Success is measured not only by the change in ΔAEP but also by

the effects on service profiles and network constraints. Hybridization with energy storage (primarily BESS 1-2 h, and for LDES: LAES/CAES/PHS) enhances the energy value by providing firming, FCR/FRR/FFR. This approach reduces curtailment and increases bankability, while also requiring reliable coverage for degradation and safety within the LCOS. February

References

1. A Comprehensive Review of Wind Power Prediction Based on Machine Learning: Models, Applications, and Challenges / Liu Z. et al. *Energies*. 2025. No. 18. P. 350. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/2/350> (Accessed February 5, 2025). MDPI.
2. A Review on Liquid Air Energy Storage: History, State of the Art and Future Perspectives / Borri E. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. No. 143. P. 110910. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120308571> (Accessed February 5, 2025). ScienceDirect.
3. Comprehensive Review of Liquid Air Energy Storage (LAES) Technologies / Rabi A.M. et al. *Energies*. 2023. No. 16. P. 6216. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6216> (Accessed February 5, 2025). MDPI.
4. DNV. *2024 Battery Scorecard*; DNV: Oslo, Norway, 2024. URL: <https://www.dnv.com/publications/2024-battery-scorecard/> (Accessed February 5, 2025). DNV.
5. ENTSO-E. *Research, Development & Innovation Roadmap 2024–2034*; ENTSO-E: Brussels, Belgium, 2024. URL: <https://www.entsoe.eu/publications/research-and-development/> (Accessed February 5, 2025). PDF: [entsoe_RDI_roadmap_2024-2034_240710.pdf](https://www.entsoe.eu/publications/research-and-development/entsoe_RDI_roadmap_2024-2034_240710.pdf). entsoe.eu+1.
6. European Commission—CORDIS. *InterOPERA: Enabling Interoperability of Multi-Vendor HVDC Grids* (Project Page). URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101095874> (Accessed February 5, 2025). CORDIS
7. Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Report 2025*; GWEC: Brussels, Belgium, 2025. URL: <https://www.gwec.net/reports> (Direct PDF link available from the report page). gwec.net+1.
8. Grid Integration of Offshore Wind Power: Standards, Control, Power Quality and Transmission / Wu D., Seo G.-S. et al. *IEEE Open Journal of Power Electronics* 2024. No. 5, Article 87512. DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3390417. URL: <https://www.nrel.gov/publications> (Accessed February 5, 2025). PDF. docs.nrel.gov.
9. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Power Generation Costs in 2024*; IRENA: Abu Dhabi, 2025. URL: <https://www.irena.org/> (Accessed February 5, 2025). PDF: [IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf](https://www.irena.org/publications/2025/02/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf). IRENA+1.
10. InterOPERA Consortium. *Project Website—Technical Frameworks and Standards for HVDC Interoperability*. URL: <https://interopera.eu/> (Accessed February 5, 2025). interopera.eu.
11. Lazard. *LCOE+—June 2024 (Version 17.0)*; Lazard LLC: New York, USA, 2024. URL: <https://www.lazard.com/> (Accessed October 5, 2025). PDF: [lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf](https://www.lazard.com/media/45702/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf). <https://www.lazard.com>

12. Lazard. *Levelized Cost of Energy+ (LCOE+)—Version 18.0*; Lazard LLC: New York, USA, 2025. Available online: <https://www.lazard.com/> (Accessed February 5, 2025). PDF: [lazards-lcoeplus-june-2025.pdf](https://lazard.com/lazards-lcoeplus-june-2025.pdf). <https://lazard.com>.
13. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *2024 Electricity Annual Technology Baseline (ATB)*; NREL: Golden, CO, USA, 2024. URL: <https://atb.nrel.gov/electricity/2024/> (Accessed February 5, 2025). atb.nrel.gov.
14. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Annual Technology Baseline (ATB) 2024—Distributed Wind*; NREL: Golden, CO, USA, 2024. URL: https://atb.nrel.gov/electricity/2024/distributed_wind (Accessed February 5, 2025). atb.nrel.gov.
15. New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA). *Energy Storage System Performance Impact Evaluation, 2024*. NYSERDA: Albany, NY, USA, 2024. URL: <https://www.nysesda.ny.gov/-/media/Project/Nyserda/Files/Publications/PPSER/NYSERDA/2024-Energy-Storage-Impact-Evaluation-Report.pdf> (Accessed February 5, 2025).
16. NREL. *2024 Electricity ATB—Technologies and Data Overview*; NREL: Golden, CO, USA, 2024. URL: <https://atb.nrel.gov/electricity/2024/index> (Accessed February 5, 2025). atb.nrel.gov.
17. NREL. *ATB 2024—Land-Based Wind*; NREL: Golden, CO, USA, 2024. URL: https://atb.nrel.gov/electricity/2024/land-based_wind (Accessed February 5, 2025). atb.nrel.gov.
18. *Offshore Wind Market Report: 2024 Edition* / McCoy A. et al. NREL/DOE: Golden, CO/Washington, DC, USA, 2024. URL: <https://www.nrel.gov/publications/> (Accessed February 5, 2025). PDF. docs.nrel.gov.
19. Reuters. *New wind capacity falls short despite reaching a record, industry body says*; 23 April 2025. URL: <https://www.reuters.com/> (Accessed February 5, 2025). Reuters.
20. Reuters. *New wind installations hit a record last year, report says*; 16 April 2024. URL: <https://www.reuters.com/> (Accessed February 5, 2025). Reuters.
21. Simley E., Millstein D., Jeong S., Fleming P. The Value of Wake Steering Wind Farm Flow Control in US Energy Markets. *Wind Energy Science*, 2024. No. 9. P. 219–242. URL: <https://wes.copernicus.org/articles/9/219/2024/> (Accessed February 5, 2025). wes.copernicus.org.
22. *The Value of Wake Steering...* / Simley E. et al. (Technical Report); NREL: Golden, CO, USA, 2024. URL: <https://docs.nrel.gov/> (Accessed February 5, 2025). PDF: [89007.pdf](https://docs.nrel.gov/89007.pdf). docs.nrel.gov
23. Wind Power Forecasting with Machine Learning Algorithms / Buestán-Andrade P. A. et al. *Electronics*, 2024. No. 13. P. 1541. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/8/1541> (Accessed February 5, 2025). MDPI.

Стаття надійшла 16.02.2025

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 621.313.333

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КРАЙОВИХ
УМОВ ДО ХВИЛЬОВОГО РІВНЯННЯ ДОВГОЇ ЛІНІЇ

*Віталій Левонюк, к. т. н., Дмитро Гречин, к. т. н.,
Тарас Михайлович, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: vitaliy_levoniuk@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.94-104>

Левонюк В., Гречин Д., Михайлович Т. Порівняльний аналіз схем заміщення для ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії

У статті запропоновано методику ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії, яка ґрунтується на застосуванні схем заміщення крайових дискретних ділянок лінії електропередачі. Основна увага зосереджена на порівняльному аналізі трьох типів схем – Γ -, T - та Π -схем – з метою дослідження впливу їхньої топології та симетрії на точність чисельного моделювання перехідних електромагнітних процесів у лініях із розподіленими параметрами. Математична модель побудована на основі хвильового (телеграфного) рівняння з частинними похідними другого порядку, яке описує динаміку напруги та струму вздовж лінії. Крайові умови Неймана та Робена-Пуанкаре формуються за допомогою врахування параметрів схем заміщення в аналітичному вигляді. Особливу увагу приділено дослідженню асиметрії, яка виникає під час застосування Γ -схеми: показано, що така схема спричиняє порушення умов суперпозиції хвиль та залежність результатів від напрямку живлення. У протилежність цьому, T - та Π -схеми забезпечують симетричне навантаження моделі та стабільність розрахункових результатів. Проведено числові експерименти в середовищі *Intel Visual Fortran Compiler*, які підтвердили наявність похибки при застосуванні Γ -схеми та точність T - і Π -схем. Наукова новизна роботи полягає у вперше запропонованому підході до ідентифікації крайових умов хвильового рівняння на основі схем заміщення дискретних ділянок лінії з оцінкою їх симетрії та впливу на точність моделювання. Запропонована методика є універсальною та може бути застосована під час моделювання як високовольтних ліній постійного, так і змінного струму, що підвищує її наукову та інженерну цінність. Представлений підхід дає змогу покращити роботу наявних програм електромагнітних розрахунків, забезпечуючи вищу стабільність обчислень та узгодженість крайових умов для складних режимів.

Ключові слова: схема заміщення, довга лінія, крайові умови, Γ -схема, T -схема, Π -схема, ідентифікація.

Levoniuk V., Hrechyn D., Mykhailovych T. Comparative analysis of equivalent circuit models for boundary condition identification in the wave equation of a long transmission line

This paper proposes a methodology for identifying boundary conditions for the wave equation of a long transmission line, based on the use of equivalent circuits for the terminal discrete sections of the line. The main focus is made to the comparative analysis of three types of substitution schemes – Γ -, T -, and π -equivalent circuits – in order to investigate how their topology and symmetry affect the accuracy of numerical modeling of transient electromagnetic processes in lines with distributed parameters. The mathematical model is built upon the wave (telegraph) equation with second-order partial derivatives, which describes the dynamics of voltage and current along the line. Neumann and Robin–Poincaré boundary conditions are shaped analytically by incorporating the parameters of the equivalent circuits. Particular attention is given to the asymmetry arising from the use of the Γ -scheme. It is demonstrated that this scheme disrupts wave superposition, resulting in outcomes that vary depending on the direction of line energization. In contrast, the T - and π -schemes ensure symmetric loading of the model, leading to stable computational outcomes. Numerical experiments carried out in *Intel Visual Fortran Compiler* confirm the presence of systematic errors in the Γ -scheme and the accuracy of the T - and π -schemes. The scientific novelty lies in the first-time proposal of a boundary condition identification approach for the wave equation based on equivalent circuit with symmetry evaluation and accuracy analysis. The proposed methodology is universal and can be applied to the modelling of high-voltage transmission lines operating under both direct and alternating current, which enhances its scientific and engineering value. The presented approach makes it possible to improve the performance of existing electromagnetic simulation tools by ensuring higher computational stability and consistent boundary-condition formulation under complex operating regimes.

Keywords: equivalent circuit, long transmission line, boundary conditions, Γ -equivalent circuit, T -equivalent circuit, π -equivalent circuit, identification.

Постановка проблеми. Математичне моделювання нестационарних електромагнітних процесів у довгих лініях електропередачі є ключовим інструментом для аналізу динаміки сучасних електроенергетичних систем. Особливого значення набувають підходи, які ґрунтуються на методах електромагнітного поля, що дають змогу точно враховувати розподілені параметри ліній. На відміну від колових схем заміщення, польові методи забезпечують більш адекватне відображення хвильових явищ, особливо в умовах нестабільності режимів та високих напруг, що підтверджується як літературними джерелами [4; 10], так і практичним досвідом авторів.

У працях [5; 11] обґрунтовано переваги застосування рівнянь довгої лінії з частинними похідними, які дають змогу з високою точністю описувати хвильові процеси, зокрема явища рефлексії, атенуації та дисперсії. Такі ефекти є критичними під час дослідження перехідних процесів, викликаних короткими замиканнями, комутаціями чи атмосферними перенапругами.

У рамках проведених досліджень авторським колективом здійснюється математичне моделювання електромагнітних процесів у повітряних лініях електропередачі великої протяжності з використанням сучасних чисельних методів. Основна увага приділяється підвищенню точності і стабільності обчислень, що є важливою передумовою для надійного функціонування енергосистем та вдосконалення засобів їхнього аналізу.

Теоретичною основою побудови математичних моделей слугує рівняння довгої лінії з частинними похідними другого порядку:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (L_0 g_0 + r_0 C_0) \frac{\partial u}{\partial t} + r_0 g_0 u. \quad (1)$$

Рівняння (1) у науковій літературі часто називають телеграфним рівнянням або хвильовим рівнянням довгої лінії [13]. Його можна отримати кількома методами – як класичними, які ґрунтуються на топологічних (колових) підходах із використанням законів Кірхгофа, так і неklasичними, зокрема із застосуванням загальних законів електродинаміки (закону електромагнітної індукції та закону збереження заряду), або ж з використанням варіаційних принципів.

У статті детальний аналіз виведення рівняння не розглядатиметься, оскільки він виходить за рамки поставлених завдань.

Хвильове рівняння довгої лінії (1) тісно пов'язане з континуумною моделлю лінії електропередачі, оскільки воно описує електромагнітні процеси в лінії як у неперервному середовищі з

розподіленими параметрами. Завдяки цьому властивості лінії розглядаються без поділу на окремі елементи, що дає змогу точно моделювати динаміку напруги та струму як хвильових процесів, які поширюються у просторі й часі, враховуючи взаємодію параметрів по всій довжині лінії.

Як узагальнену координату в рівнянні (1) вибрано функцію напруги, хоча відомо, що аналогічні рівняння можна сформулювати і для струму або навіть для розподілу електричного заряду [10]. З метою подальших розрахунків та спрощення викладу матеріалу перепишемо рівняння (1) у такому вигляді:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (L_0 C_0)^{-1} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (L_0 g_0 + r_0 C_0) v - r_0 g_0 u, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v. \quad (2)$$

Як крайові умови для розв'язку рівняння (2) ми зазвичай використовуємо крайові умови Неймана та Робена-Пуанкаре. Для використання згаданих крайових умов першу й останню дискретні ділянки лінії ми представляємо у коловому вигляді, із використанням Γ -подібної схеми заміщення. Відтак виникає питання точності застосування такого підходу, оскільки використання Γ -схеми для заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії робить її несиметричною відносно її кінців, а отже, і просторовий розподіл напруг та струмів у лінії буде представлено з деякою похибкою. Ми вирішили детальніше розібратися в цьому питанні і здійснити відповідні дослідження з використанням числових експериментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Літературний пошук у відкритих наукометричних базах показав, що наукові публікації, присвячені застосуванню схем заміщення першої та останньої дискретних ділянок для ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії, практично відсутні. Натомість існують роботи, дотичні за тематикою, проте їх кількість обмежена. Розглянемо деякі з них.

У статті [3] проаналізовано різні математичні моделі високовольтних ліній електропередачі для оцінки розподілу струмів короткого замикання в заземлювальних системах опор. Основну увагу приділено точності моделей із різним рівнем спрощення. Автори порівнюють мультифазну модель, побудовану на основі Π -схеми, з декількома спрощеними моделями на основі T -схеми заміщення дискретних ділянок. Результати дали змогу виявити похибки, які виникають унаслідок таких спрощень.

У праці [2] запропоновано регресійні моделі для T -схеми заміщення середніх за довжиною ліній електропередачі напругою 154 кВ на основі

параметричних симуляцій, виконаних у середовищі *ANSYS Electronics Twin Builder*. Досліджено вплив параметрів лінії (довжина, опір, індуктивність, ємність) на перебіг електромагнітних процесів. Запропонований підхід дає змогу уникнути складностей класичних розрахунків параметрів ліній завдяки використанню параметричних симуляцій.

Автори статті [8] зосереджують увагу на числових характеристиках моделей ліній електропередачі із зосередженими параметрами, зокрема для безвтратних ліній. Розглянуто можливості усунення числових осциляцій, які виникають у процесі моделювання. Запропоновано стабільний числовий алгоритм для підвищення точності розрахунків. Досліджено динамічну поведінку моделей, побудованих на основі P -, T - та G -схем заміщення, із застосуванням таких чисельних методів, як метод трапецій, неявний метод Ейлера та багатокрокові методи.

Праця [6] присвячена формалізації моделей ліній електропередачі на основі параметрів $ABCD$ за допомогою інструмента *HOL Light* для формальної верифікації. $ABCD$ -матриці використано для математичного опису чотириполісників, які репрезентують лінії. Формалізовано моделі коротких та середніх за довжиною ліній у вигляді P - та T -схем, а також каскадних структур. Автори підкреслюють важливість формальної верифікації для побудови точних і надійних моделей, особливо в критичних застосуваннях енергетики та бездротової передачі енергії.

У монографії [7] детально висвітлено фізичну природу й математичну інтерпретацію комплексного параметра поширення γ , яке використовується у хвильовому рівнянні довгої лінії. Цей параметр представлено у вигляді суми коефіцієнта атенюації α та фазового коефіцієнта β , які описують відповідно атенюацію і фазовий зсув електромагнітної хвилі при її поширенні. Зазначено, що навіть незначні порушення симетрії або точності моделювання, особливо щодо крайових умов, можуть суттєво вплинути на значення параметра γ , що чергово призводить до похибок у відтворенні напруг і струмів лінії. Це підтверджує потребу глибшого аналізу крайових умов, зокрема із застосуванням схем заміщення, задля підвищення точності чисельного моделювання.

Аналіз наявних джерел свідчить, що застосуванню P -, T - та G -схем заміщення для побудови математичних моделей електропередачі приділено значну увагу в контексті вдосконалення чисельних методів, формальної верифікації та підвищення точності моделювання. Проте використання таких схем саме для ідентифікації крайових умов до

хвильового рівняння довгої лінії залишається недостатньо дослідженим. Це вказує на наукову новизну та актуальність подальших розробок у цьому напрямі.

Постановка завдання. Враховуючи викладене, метою роботи є обґрунтування доцільності застосування схем заміщення для ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії, а також аналіз впливу топології та симетрії G -, T - і P -схем крайових дискретних ділянок на точність відтворення просторового розподілу напруг і струмів у моделі довгої лінії, описаній рівнянням з частинними похідними другого порядку.

Виклад основного матеріалу. Для здійснення числових експериментів і проведення порівняльного аналізу їхніх результатів нам потрібно розробити досліджувані математичні моделі лінії електропередачі. Ми вже неодноразово здійснювали побудови математичних моделей подібного плану, ознайомитися з якими можна, наприклад, у наших працях [1; 9], тому не будемо дуже детально розглядати побудову математичних моделей, а висвітлимо лише ключові етапи цієї процедури. Також для спрощення й полегшення розуміння евентуальному читачеві ми здійснюватимемо дослідження на об'єктах, які представлені в однолінійному виконанні.

Для проведення аналізу обрано лінію електропередачі постійного струму. Такий вибір зумовлений низкою чинників, які значно спрощують аналіз та підвищують точність обчислень. У системах постійного струму, на відміну від змінного, виключається необхідність обчислення діючих значень напруг і струмів, що істотно знижує складність математичного моделювання. Це дає змогу зосередитися на координатах усталеного режиму роботи, уникаючи надлишкових обчислювальних витрат.

Наперед варто відзначити, що аналіз будемо здійснювати для моменту часу усталеного режиму роботи лінії. Оскільки сталі часу для G -, T - та P -схем заміщення є різними, то це може призводити до суттєвих розбіжностей у миттєвих значеннях для заданого моменту часу, що знижує однозначність аналізу.

Таким чином, обрані об'єкт і режим забезпечують баланс між простотою реалізації і достатнім рівнем точності для дослідження перехідних та усталених режимів роботи лінії. Це дає змогу зосередитися на структурних аспектах моделювання, таких як застосування різних схем заміщення для ідентифікації крайових умов до рівняння довгої лінії.

Першочергово представимо розробку математичної моделі лінії електропередачі, коли для ідентифікації крайових умов до рівняння довгої лінії використано пряму Γ -подібну схему заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі.

На рис. 1 представлено розрахункову схему заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні прямої Γ -схеми заміщення.

Розрахункова схема заміщення, яка представлена на рис. 1, складається з першої та останньої

дискретних ділянок лінії електропередачі, які представлені прямою Γ -схемою заміщення з повздовжніми параметрами – активним опором $r_0\Delta x$ та індуктивністю $L_0\Delta x$ і поперечними параметрами – активною провідністю $g_0\Delta x$ та ємністю $C_0\Delta x$, де Δx – крок дискретизації. З обох сторін (зліва та справа) до лінії електропередачі приєднано гілки еквівалентного активно-індуктивного навантаження з параметрами: r_{HL}, L_{HL} – зліва та r_{HP}, L_{HP} – справа. Живлення лінії відбуватиметься по чергово від двох джерел нескінченної потужності: e_1 – зліва та e_2 – справа.

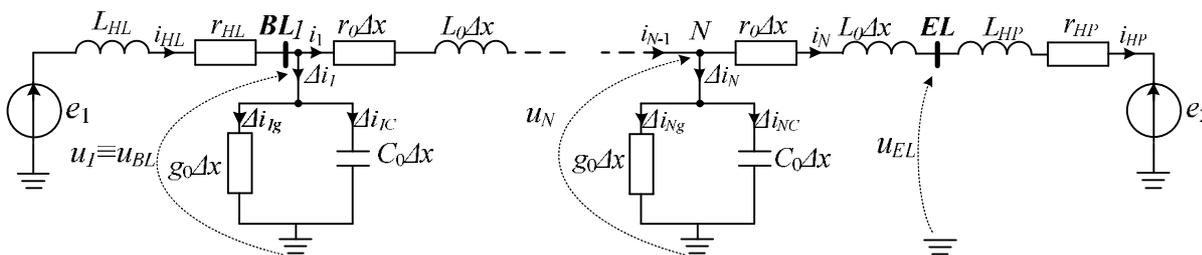


Рис. 1. Розрахункова схема заміщення дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні прямої Γ -схеми заміщення

Fig. 1. Computational equivalent circuit of discrete sections of the transmission line using the direct Γ -equivalent circuit

Дискретизуючи рівняння (2), із використанням методу прямих (центральна похідна), отримаємо:

$$\frac{dv_j}{dt} = (L_0 C_0)^{-1} \frac{\partial^2 u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta x)^2} - (L_0 g_0 + r_0 C_0) v_j - r_0 g_0 u_j \quad (3)$$

де Δx – крок дискретизації; j – номер вузла дискретизації лінії електропередачі.

Аналізуючи рівняння (3), легко побачити, що за їх допомогою ми зможемо знайти напруги у всіх вузлах, крім першого та останнього ($j = 2 \dots N-1$), оскільки для знаходження напруги на першому ($j = 1$) та останньому ($j = N$) нам потрібно знати напруги на фіктивних вузлах на початку (u_0) та в кінці (u_{N+1}) лінії електропередачі. Ознайомитися з методиками пошуку цих напруг на основі крайових умов Робена-Пуанкаре можна, наприклад, у наших працях [1; 9; 12]. Натомість у цій статті для розв’язання поставлених завдань ми пропонуємо використати крайові умови Неймана, зокрема знаходити напруги на першому та останньому вузлах дискретизації як напругу на ємності $C_0\Delta x$.

Фактично, розв’язуючи рівняння (3, $j = 2 \dots N-1$), ми будемо мати картину розподілу напруг у

внутрішньому континуумі лінії, який описується диференціальними рівняннями із частинними похідними, натомість напруги по краях лінії (крайові умови) пропонуємо знаходити на основі колових підходів. Представимо пошук фіктивних напруг на краях лінії електропередачі.

Для схеми, представленій на рис. 1, запишемо рівняння стаціонарних зв’язків:

$$i_{HL} - i_1 - D_{i1} = 0, \quad D_{i1} = D_{i1c} + D_{i1g}, \quad (4)$$

$$D_{i1g} = g_0 \Delta x u_1;$$

$$i_{N-1} - i_N - D_{iN} = 0, \quad D_{iN} = D_{iNc} + D_{iNg}, \quad (5)$$

$$D_{iNg} = g_0 \Delta x u_N,$$

де Δi_j – струми витoku на ділянці Δx ; $\Delta i_{jg}, \Delta i_{jc}$ – струми витoku через активну провідність та ємнісну провідність на ділянці Δx відповідно.

Враховуючи рівняння (4) і (5), на основі законів електротехніки можемо записати:

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{1}{\Delta x C_0} (i_{HL} - i_1) - \frac{g_0}{C_0} u_1,$$

$$\frac{du_N}{dt} = \frac{1}{\Delta x C_0} (i_{N-1} - i_{HP}) - \frac{g_0}{C_0} u_N. \quad (6)$$

Струми в гілках навантаження на початку та кінці лінії електропередачі можемо знайти з диференціальних рівнянь, які легко отримати на основі II закону Кірхгофа (див. рис. 1):

$$\begin{aligned} \frac{di_{HL}}{dt} &= \frac{1}{L_{HL}}(e_1 - r_{HL}i_{HL} - u_1), \\ \frac{di_{HP}}{dt} &= \frac{1}{L_{HP}}(u_{EL} - r_{HP}i_{HP} - e_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Струми в дискретних гілках лінії можемо знайти, використовуючи рівняння довгої лінії першого порядку, яке можна легко отримати на основі закону електромагнітної індукції:

$$- \frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (8)$$

Дискретизуючи рівняння (8) методом прямих, але на цей раз використовуючи поняття правої похідної, отримаємо рівняння

$$- \frac{u_{j+1} - u_j}{\Delta x} = r_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}, \quad (9)$$

звідки будемо мати

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_j - u_{j+1}) - \frac{r_0}{L_0} i_j, \quad j=1, \dots, N-1. \quad (10)$$

Тепер покажемо, як можна знайти напругу в кінці лінії електропередачі. За II законом Кірхгофа, для схеми, представленої на рис. 1, можемо записати:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{\Delta x L_0} (u_N - \Delta x r_0 i_N - u_{EL}). \quad (11)$$

Оскільки струм в останній дискретній гілці тотожно рівний струму в гілці навантаження з правого боку лінії $i_N \equiv i_{HP}$, то з урахуванням початкових умов можемо записати:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{di_{HP}}{dt}. \quad (12)$$

Підставивши у рівняння (12), друге рівняння з (7) та рівняння (11), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x L_0} (u_N - \Delta x r_0 i_N - u_{EL}) &= \\ &= \frac{1}{L_{HP}} (u_{EL} - r_{HP} i_{HP} - e_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Виразивши з рівняння (13) напругу в кінці лінії u_{EL} , отримаємо:

$$u_{EL} = \frac{\Delta x L_0 L_{HP}}{\Delta x L_0 + L_{HP}} \times \frac{1}{L_{HP}} (r_{HP} i_{HP} + e_2) + \frac{1}{\Delta x L_0} (u_N - \Delta x r_0 i_N) \dot{u} \quad (14)$$

Сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (3, $j=2, \dots, N-1$), (6), (7), (10, $j=1, \dots, N-1$), (11) з урахуванням (4), (5) та (14).

Щодо розробки аналогічної моделі з використанням зворотної Γ -схеми, то цього робити не потрібно, адже специфіка проведення числових експериментів, при якій живлення лінії відбуватиметься по чергово від джерел e_1 та e_2 , уже апіорі передбачатиме використання зворотної схеми. Деталі проведення такого числового експерименту опишемо в результатах числових експериментів.

Наступним кроком ми пропонуємо ознайомитися із застосуванням T -схеми заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії для ідентифікації крайових умов.

На рис. 2 представлено розрахункову схему заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні T -схеми заміщення.

Розрахункова схема заміщення, яка представлена на рис. 2, складається з першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі, які представлені T -схемою заміщення з повздовжніми половинними параметрами – активними опорами $r_0 \Delta x / 2$ та індуктивностями $L_0 \Delta x / 2$ і поперечними параметрами – активною провідністю $g_0 \Delta x$ та ємністю $C_0 \Delta x$, де Δx – крок дискретизації. Аналогічно до попереднього випадку, з обох боків (зліва та справа) до лінії електропередачі приєднано гілки еквівалентованого активно-індуктивного навантаження з параметрами r_{HL} , L_{HL} – зліва та r_{HP} , L_{HP} – справа. Живлення лінії відбуватиметься по чергово від двох джерел нескінченної потужності: e_1 – зліва та e_2 – справа.

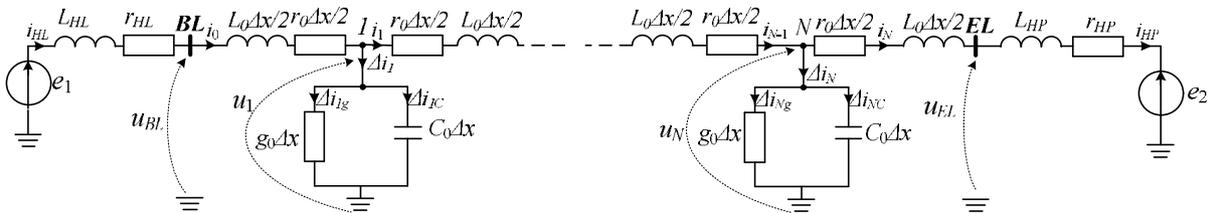


Рис. 2. Розрахункова схема заміщення дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні T -схеми заміщення

Fig. 2. Computational equivalent circuit of discrete sections of the transmission line using the T -equivalent circuit

Використання цієї схеми є досить цікавою задачею, оскільки в ній, на відміну від попереднього випадку, струми у лінії не можна знаходити із системи диференціальних рівнянь суцільного континууму лінії. Це пов'язано з тим, що крайні гілки з лівого та правого боку лінії мають половинні параметри ($\Delta x/2$). У попередньому випадку це можна було робити за умови пошуку фіктивних напруг на основі крайових умов Робена-Пуанкаре, але для уможливлення використання спільного підходу для всіх трьох схем заміщення ми відмовилися від цього і використали крайові умови Неймана. У теоретичному плані використання T -схеми заміщення має свої переваги, оскільки лінія буде повністю симетрична відносно її кінців.

Аналогічно, як і в попередньому випадку, напруги та струми ми знаходитимемо з диференціальних рівнянь (3, $j = 2, \dots, N-1$) та (10, $j = 2, \dots, N-1$). Натомість напруги в першому та останньому дискретних вузлах, а також струми у крайніх півгілках потрібно знаходити на основі колових підходів.

Для схеми, представленої на рис. 2, рівняння стаціонарних зв'язків та диференціальні рівняння для знаходження напруг на першому та останньому вузлах дискретизації будуть такими самими (рівняння (4) – (6)), як і для схеми на рис. 1, проте рівняння електромагнітного стану крайніх півгілок та гілок навантаження будуть іншими:

$$\begin{aligned} \frac{di_0}{dt} &= \frac{2}{L_0 \Delta x} \frac{\partial}{\partial x} u_{BL} - \frac{r_0 \Delta x}{2} i_0 - u_1 \frac{\partial}{\partial t}, \\ \frac{di_N}{dt} &= \frac{2}{L_0 \Delta x} \frac{\partial}{\partial x} u_N - \frac{r_0 \Delta x}{2} i_N - u_{EL} \frac{\partial}{\partial t}. \end{aligned} \quad (15)$$

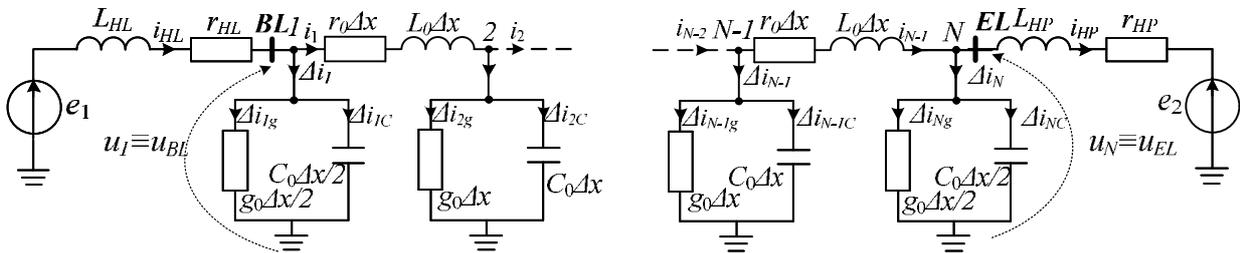


Рис. 3. Розрахункова схема заміщення дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні Π -схеми заміщення

Fig. 3. Computational equivalent circuit of discrete sections of the transmission line using the π -equivalent circuit

Розрахункова схема заміщення, яка представлена на рис. 3, складається з фрагмента першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі, які представлені Π -схемою заміщення. Крайні поперечні параметри, згідно з теоретичними

$$\begin{aligned} \frac{di_{HL}}{dt} &= \frac{1}{L_{HL}} (e_1 - r_{HL} i_{HL} - u_{BL}), \\ \frac{di_{HP}}{dt} &= \frac{1}{L_{HP}} (u_{EL} - r_{HP} i_{HP} - e_2). \end{aligned} \quad (16)$$

Оскільки через наявність по краях лінії півгілок $r_0 \Delta x/2$ та $L_0 \Delta x/2$ напруга на початку лінії не дорівнює напрузі першого вузла дискретизації $u_{BL} \neq u_1$ та напруга в кінці лінії не дорівнює напрузі останнього вузла дискретизації, $u_{EL} \neq u_N$, то нам потрібно знайти ці напруги. Знаходимо ці напруги у спосіб, який описано вище для T -схеми. Представимо кінцеві вирази для знаходження цих напруг.

$$\begin{aligned} u_{BL} &= \frac{L_{HL} L_0 \Delta x}{L_0 \Delta x + 2L_{HL}} \times \\ &\times \left[\frac{e_1}{L_0 \Delta x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{r_0 \Delta x}{2} i_0 + u_1 \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{L_{HL}} (e_1 - r_{HL} i_{HL}) \frac{\partial}{\partial t} \right], \\ u_{EL} &= \frac{L_{HP} L_0 \Delta x}{L_0 \Delta x + 2L_{HP}} \times \\ &\times \left[\frac{e_2}{L_0 \Delta x} \frac{\partial}{\partial x} - \frac{r_0 \Delta x}{2} i_N - u_N \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{L_{HP}} (r_{HP} i_{HP} + e_2) \frac{\partial}{\partial t} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Відтак для аналізу процесів у довгій лінії електропередачі з використанням T -схем заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (3, $j = 2, \dots, N-1$), (6), (10, $j = 1, \dots, N-1$), (15), (16) з урахуванням (4), (5) та (17).

Тепер розглянемо застосування Π -схеми заміщення дискретних ділянок лінії електропередачі. На рис. 3 представлено розрахункову схему заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі при застосуванні Π -схеми заміщення.

положеннями, будуть складати половину погонної активної провідності – $g_0 \Delta x/2$ та ємності – $C_0 \Delta x/2$, де Δx – крок дискретизації. Аналогічно до попередніх випадків, з обох сторін (зліва та справа) до лінії електропередачі приєднано гілки еквівалентованих

активно-індуктивних навантажень із параметрами r_{HL}, L_{HL} – зліва та r_{HP}, L_{HP} – справа. Живлення лінії відбуватиметься почергово від двох джерел нескінченної потужності: e_1 – зліва та e_2 – справа.

Π -схема заміщення є теж симетричною відносно кінців лінії електропередачі. Варто відзначити, що при застосуванні Π -схеми заміщення кількість струмів є на один меншою від кількості вузлів дискретизації (напруг), що дає змогу здійснювати пошук струмів у дискретних гілках лінії із системи диференціальних рівнянь (10) ($j_i = 1 \dots N$) для суцільного континууму лінії. Представимо пошук напруг першого та останнього дискретних вузлів лінії електропередачі.

Для схеми, представленої на рис. 3, запишемо рівняння стаціонарних зв'язків:

$$\begin{aligned} i_{HL} - i_1 - Di_1 &= 0, \\ Di_1 &= Di_{1C} + Di_{1g}, \quad Di_{1g} = \frac{g_0 Dx}{2} u_1; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} i_N - i_{HP} - Di_N &= 0, \\ Di_N &= Di_{NC} + Di_{Ng}, \quad Di_{Ng} = \frac{g_0 Dx}{2} u_N. \end{aligned} \quad (19)$$

Тепер, аналогічно до попередніх випадків, запишемо рівняння для знаходження напруг на першому та останньому вузлах дискретизації, враховуючи рівняння стаціонарних зв'язків (18) і (19):

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= \frac{2}{DxC_0} (i_{HL} - i_1) - \frac{g_0}{C_0} u_1, \\ \frac{du_N}{dt} &= \frac{2}{DxC_0} (i_N - i_{HP}) - \frac{g_0}{C_0} u_N. \end{aligned} \quad (20)$$

Струми в гілках навантаження можна знайти з таких диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{di_{HL}}{dt} &= \frac{1}{L_{HL}} (e_1 - r_{HL} i_{HL} - u_1), \\ \frac{di_{HP}}{dt} &= \frac{1}{L_{HP}} (u_N - r_{HP} i_{HP} - e_2). \end{aligned} \quad (21)$$

Здійснювати окремий пошук напруг на початку та кінці лінії електропередачі не має змісту, оскільки вони тотожно рівні напругам першого та останнього вузлів дискретизації ($u_{BL} \equiv u_1, u_{EL} \equiv u_N$) відповідно.

Сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (3, $j = 2, \dots, N-1$), (10, $j = 1, \dots, N-1$), (20), (21) з урахуванням (18) та (19).

Результати числових експериментів. На основі розроблених математичних моделей мовою програмування *Fortran* у середовищі *Intel Visual Fortran Compiler* версії 19.x було написано програмні коди, які дають змогу здійснювати моделювання роботи лінії електропередачі. Як уже згадувалося

раніше, комп'ютерні експерименти здійснювалися для визначення симетричності розподілу струмів та напруг у лінії електропередачі за використання Γ -, T - та Π -схем заміщення першої і останньої дискретних ділянок лінії електропередачі при ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії. Було здійснено три числових експерименти, відповідно по одному для кожної схеми заміщення, кожен експеримент складався з двох етапів: на першому етапі живлення лінії відбувається з лівого боку, а з правого боку до лінії приєднано еквівалентоване активно-індуктивне навантаження, у другому етапі – навпаки. Інтегрування звичайних диференціальних рівнянь здійснювалося методом Гіра 2-го порядку з часовим кроком $\Delta t = 27$ мкс.

Задля зручності порівняння отриманих результатів для розрахунків було прийнято уніполярну лінію постійного струму $e_1 = e_2 = 400$ кВ довжиною 473 км. Лінія має такі параметри: $r_0 = 0,82 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $L_0 = 0,175 \cdot 10^{-5}$ Гн/м, $C_0 = 0,103 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, $g_0 = 3,232 \cdot 10^{-10}$ См/м. Для всіх експериментів параметри еквівалентованого активно-індуктивного навантаження становили $R_{HL} = R_{HP} = 350$ Ом, $L_{HL} = L_{HP} = 1$ Гн. Експерименти здійснювалися для увімкнення лінії в початковий момент часу ($t = 0$ с) та виходу системи в ustalений режим. Для наочного відображення та розуміння картини перебігу перехідних процесів у модельованій лінії постійного струму, для прикладу, на рис. 4 і 5 представлено перехідні процеси напруги по середині лінії та струму через гілку навантаження при використанні Γ -схеми заміщення відповідно.

Перехідні процеси при використанні Γ -, T - та Π -схем мають незначні відмінності, які пов'язані з різними сталими часу цих схем, тому задля уникнення зайвих похибок ми будемо здійснювати порівняння координат ustalеного режиму.

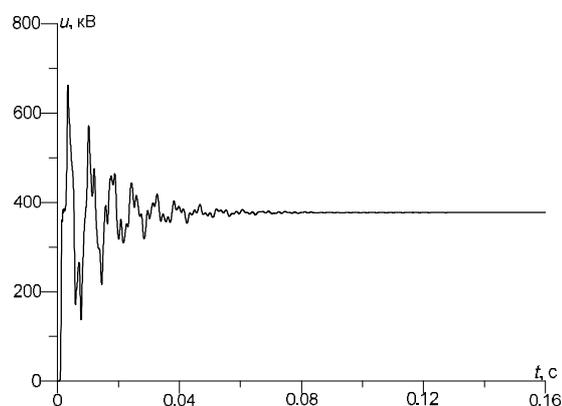


Рис. 4. Перехідний процес напруги по середині лінії
Fig. 4. Transient voltage process at the midpoint of the transmission line

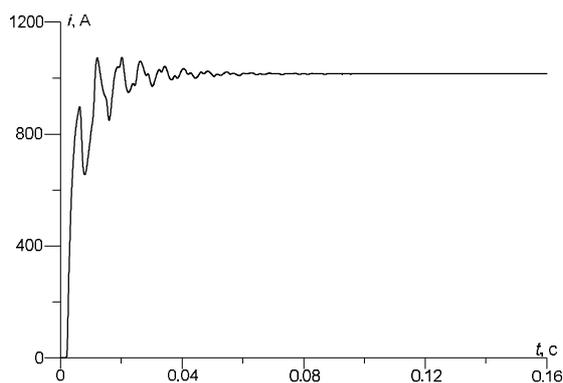


Рис. 5. Перехідний процес струму через гілку навантаження

Fig. 5. Transient current process through the load branch

Оскільки комп'ютерні симуляції другого етапу кожного експерименту здійснювалися без зміни розроблених моделей, то значення струмів для другого етапу кожного експерименту представлено по модулю.

Перший експеримент. Перший експеримент здійснювали на основі Γ -схеми заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі. Дискретизація хвильового рівняння лінії (2) відбувалася на 20 частин ($N = 20$), відповідно $\Delta x = 473/20 = 23,65$ км. Для цього експерименту взято парну кількість вузлів, щоб можна було висвітлювати значення напруги в геометричному центрі лінії.

У першому етапі $e_1 = 400$ кВ, $e_2 = 0$ кВ, $R_{HP} = 350$ Ом, $L_{HP} = 1$ Гн. Оскільки згідно з II законом комутації напруга на ємності миттєво змінитися не може, між джерелом живлення та лінією електропередачі ми будемо вмикати RL -гілку, у першому етапі $R_{HL} = 2$ Ом, $L_{HL} = 0,1$ Гн.

У другому етапі живлення відбувалося з протилежної сторони лінії, $e_2 = 400$ кВ,

$e_1 = 0$ кВ, $R_{HL} = 350$ Ом, $L_{HL} = 1$ Гн. У цьому етапі немає необхідності введення RL -гілки між джерелом живлення та лінією, оскільки використовується пряма Γ -схема заміщення і між останнім дискретним вузлом N та джерелом живлення e_2 знаходиться остання дискретна гілка лінії $r_0\Delta x L_0\Delta x$. Однак для дотримання симетричності досліджуваних систем ми вимушені додатково ввести RL -гілку з аналогічними параметрами, як у першому етапі: $R_{HP} = 2$ Ом, $L_{HP} = 0,1$ Гн.

Ми не висвітлюватимемо отримані результати для всіх дискретних ділянок лінії, а представимо лише для початку, центру та кінця лінії. Результати першого експерименту подано в табл. 1.

Аналіз результатів першого експерименту доцільно розпочати із значень напруги. Оскільки лінія несиметрична відносно її кінців (при застосуванні прямої Γ -схеми заміщення), то ми можемо порівнювати напругу лише в геометричному центрі лінії електропередачі. У нашому випадку геометричним центром лінії є одинадцятий дискретний вузол. Бачимо, що напруги одинадцятого дискретного вузла відрізняються на 45 В при напрузі живлення лінії 400 кВ, відносна похибка становить 0,01 %. Щодо напруг в інших вузлах, то, на жаль, подібних порівнянь здійснити неможливо через конфігурацію Γ -схеми.

Для порівняльного аналізу струмів ми можемо використати вже два значення. Перше значення – це струми по середині лінії (вони мають бути, як і напруги, однаковими), а друге – струми через гілку навантаження. Геометрично, струм по середині лінії – це струм у десятій дискретній гілці лінії. Бачимо, що струми в десятій дискретній гілці лінії відрізняються на 0,3 А, що становить 0,02 % відносної похибки. Аналогічні абсолютну та відносну похибки має і струм через гілки навантажень (двадцята дискретна гілка для першого етапу та струм i_{HL} для другого етапу).

Таблиця 1. Результати першого експерименту

Table 1. Results of the first experiment

Вузол/Гілка	i_{HL}	1	2	...	9	10	11	...	18	19	20
Перший етап											
Напруга, В	-	397876	395808	...	381435	379398	377366	...	363319	361338	359364
Струм, А	1073,3	1070,2	1067,2	...	1046,4	1043,5	1040,7	...	1020,9	1018,1	1015,4
Другий етап											
Напруга, В	-	357310	359285	...	373276	375296	377321	...	391639	393706	395779
Струм, А	1015,1	1017,8	1020,6	...	1040,3	1043,2	1046,0	...	1066,6	1069,6	1072,6

Асиметрія Γ -схеми заміщення полягає у відсутності дзеркального відображення імпедансів на вході та виході, що призводить до порушення

умов суперпозиції хвиль при зміні напрямку живлення. У результаті центральна точка лінії виявляється нееквівалентною незалежно від

варіанта живлення, що є основною причиною виникнення похибки при застосуванні цієї схеми як моделі крайових умов.

Другий експеримент. Другий експеримент здійснювався на основі T -схеми заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі. Дискретизацію хвильового рівняння лінії (2) здійснено на 21 частину ($N = 21$), відповідно $\Delta x = 473/21 = 22,52$ км (непарна кількість вузлів необхідна для аналізу значень напруги по середині лінії).

У першому етапі $e_1 = 400$ кВ, $e_2 = 0$ кВ, $R_{HP} = 350$ Ом, $L_{HP} = 1$ Гн. З теоретичного погляду, для цього експерименту не потрібно вводити жодних додаткових RL -гілок, оскільки застосування T -схеми передбачає наявність на початку та в кінці

лінії гілок $r_0\Delta x/2$, $L_0\Delta x/2$. Однак для уможливлення порівняння між собою результатів усіх експериментів лінія повинна працювати в однакових умовах у всіх випадках. Тому ми додатково вводимо в першому етапі $R_{HL} = 2$ Ом, $L_{HL} = 0,1$ Гн.

Для другого етапу живлення відбувалося з протилежної сторони лінії електропередачі, $e_2 = 400$ кВ, $e_1 = 0$ кВ, $R_{HL} = 350$ Ом, $L_{HL} = 1$ Гн та аналогічно до першого етапу $R_{HP} = 2$ Ом, $L_{HP} = 0,1$ Гн.

Результати другого експерименту представлено у табл. 2.

Результати числового експерименту повністю підтвердили теоретичні сподівання щодо однаковості напруг у геометричному центрі лінії (одинадцятий дискретний вузол). Бачимо, що напруги повністю однакові для двох етапів.

Таблиця 2. Результати другого експерименту

Table 2. Results of the second experiment

Вузол/Гілка	i_{HL}	1	2	...	10	11	12	...	19	20	21/ i_{HP}
Перший етап											
Напруга, В	-	396879	394908	...	379281	377346	375416	...	362048	360162	358281
Струм, А	1073,0	1070,1	1067,2	...	1044,7	1042,0	1039,2	...	1020,5	1017,8	1015,2
Другий етап											
Напруга, В	-	358281	360162	...	375416	377346	379281	...	392940	394908	396879
Струм, А	1015,2	1017,8	1020,5	...	1042,0	1044,7	1047,5	...	1067,2	1070,1	1073,0

Щодо порівняння струмів, то тут теж є своя специфіка, через застосування T -схеми та використання непарної кількості дискретних вузлів ми можемо порівняти значення струмів у десятій дискретній гілці для першого етапу та одинадцятій – для другого і навпаки, також порівнянню підлягають струми у гілках навантаження. Бачимо, що струми у згаданих гілках теж повністю однакові.

Третій експеримент. Третій експеримент здійснювався на основі Π -схеми заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі. Дискретизація хвильового рівняння лінії (2) відбувалася, як і у попередньому експерименті для $N = 21$, відповідно $\Delta x = 473/21 = 22,52$ км. Однак оскільки за використання Π -схеми гілок буде на одну менше від вузлів, то дискретних ділянок буде

двадцять. Використання непарної кількості вузлів у цьому експерименті теж пов'язане з аналізом значення напруги в геометричному центрі лінії.

Аналогічно до попередніх експериментів, у першому етапі $e_1 = 400$ кВ, $e_2 = 0$ кВ, $R_{HP} = 350$ Ом, $L_{HP} = 1$ Гн, а в другому – $e_2 = 400$ кВ, $e_1 = 0$ кВ, $R_{HL} = 350$ Ом, $L_{HL} = 1$ Гн. Використання Π -схеми передбачає застосування додаткових RL -гілок, інакше електрорушійна сила буде підключена безпосереднього до ємності крайніх вузлів лінії, що порушуватиме Π закон комутації. Тому для першого етапу $R_{HL} = 2$ Ом, $L_{HL} = 0,1$ Гн і для другого $R_{HP} = 2$ Ом, $L_{HP} = 0,1$ Гн (аналогічно до попередніх експериментів).

Результати третього експерименту наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати третього експерименту

Table 3. Results of the third experiment

Вузол/Гілка	i_{HL}	1	2	...	10	11	12	...	19	20	21/ i_{HP}
Перший етап											
Напруга, В	-	397837	395849	...	380165	378233	376306	...	362964	361074	359186
Струм, А	1075,4	1074,0	1071,1	...	1048,5	1045,7	1043,0	...	1024,2	1021,6	1020,3
Другий етап											
Напруга, В	-	359186	361074	...	376306	378233	380165	...	393867	395849	397837
Струм, А	1020,3	1021,6	1024,2	...	1045,7	1048,5	1051,3	...	1071,1	1074,0	1075,4

Аналізуючи результати третього експерименту, бачимо, що, як і в попередньому експерименті, напруги по середині лінії (11 вузол дискретизації) однакові. Струми в десятій дискретній гілці на першому етапі та одинадцятій дискретній гілці другого етапу і навпаки теж однакові. Аналогічно струми у гілках навантаження на першому та другому етапах однакові.

Узагальнюючи результати експериментів, порівнюємо результати, отримані на основі різних схем, та проаналізуємо значення напруги в геометричному центрі лінії. У першому експерименті на першому етапі напруга по середині лінії становила 377366 кВ, для другого етапу 377321 кВ, у другому експерименті для обох етапів 377346 кВ, у третьому експерименті для обох етапів 377333 кВ. Відповідно найменше значення напруги було в другому етапі першого експерименту, а найбільше – у першому етапі цього ж експерименту. Щодо струмів через гілку навантаження, то бачимо, що симетричні T - та Π -схеми дають ідентичні результати, а застосування несиметричної Γ -схеми призводить до незначної похибки розміром у соті частки відсотка.

Висновки. 1. У статті здійснено порівняльний аналіз Γ -, T - та Π -схем для заміщення першої та останньої дискретних ділянок лінії електропередачі для ідентифікації крайових умов до хвильового рівняння довгої лінії. Встановлено, що використання кожної зі схем має свої переваги та обмеження, залежно від умов застосування та мети моделювання.

2. До головних результатів аналізу можна віднести такі:

- застосування Γ -схеми заміщення забезпечує простоту обчислень, проте робить лінію електропередачі несиметричною відносно її кінців, що призводить до похибки;

- T -схема є симетричною, що дає змогу уникнути похибок у результатах моделювання, проте застосування цієї схеми унеможливає знаходження струмів із загальної системи диференціальних рівнянь для всього континууму лінії електропередачі через половинні параметри дискретних ділянок лінії електропередачі на її кінцях. Також варто відзначити, що при застосуванні T -схеми заміщення кількість дискретних гілок буде на одну більшою, ніж вузлів, що теж призводить до певних незручностей;

- Π -схема, хоча і складніша в реалізації, проте забезпечує високу точність і симетричність моделювання, що робить її оптимальною для задач із надвисокою точністю. Однак, як і у випадку із T -

схемою, кількість струмів у дискретних гілках не відповідає кількості напруг у вузлах дискретизації (вузлів на один більше, ніж гілок). Окрім цього, використання цієї схеми унеможливає пошук напруг першого та останнього вузлів лінії з хвильового рівняння (розв'язок хвильового рівняння для всього континууму лінії) через наявність у них половинних параметрів ємностей та активних провідностей по краях.

3. Результати числових експериментів продемонстрували, що в разі застосування Γ -схеми напруга в геометричному центрі лінії відрізняється на 45 В для різних напрямів живлення, що є мізерною похибкою (0,01 %) при напрузі живлення лінії 400 кВ. T - та Π -схеми забезпечують однакові значення напруги та струмів у геометричному центрі та на крайніх вузлах, що підтверджує їхню симетричність та доцільність застосування у задачах із надвисокою точністю.

4. Розроблені математичні моделі та результати числових експериментів можуть бути використані для вдосконалення методів аналізу довгих ліній електропередачі постійного струму, особливо в умовах роботи з високими напругами та нестабільними режимами.

Подальші дослідження планується спрямувати на аналіз впливу параметрів лінії та режимів її роботи в електричних мережах змінного та постійного струмів, а також на інтеграцію отриманих моделей у програмні комплекси для аналізу електричних мереж.

Бібліографічний список

1. An application of the Hamilton-Ostrogradsky principle to the modeling of an asymmetrically loaded three-phase power line / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, is. 21. P. 8255.
2. Balci S., Akkaya M. Regression model extractions of a T-equivalent circuit modeling for medium-length transmission line based-on the parametric simulation approach. *Journal of Polytechnic*. 2024. Vol. 27, No. 4. P. 1649–1658.
3. Comparative analysis of high-voltage power line models for determining short-circuit currents in towers earthing systems / R. Tarko, J. Gajdzica, W. Nowak, W. Szpyra. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 4729.
4. Dommel H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*. 1969. P. 388–399.
5. Fault analysis on three phase system by auto reclosing mechanism / V. Gamit, V. Karode, K. Mistry, P. Parmar, A. Chaudhari. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4, No. 5. P. 292–298.
6. Formal verification of ABCD parameters based models for transmission lines / E. Deniz, A. Rashid, O. Hasan, S. Tahar. *Proceedings of the 10th International Symposium "Symbolic Computation in Software Science" (SCSS)*. 2024. P. 20–37.

7. Keller R. B. Design for electromagnetic compatibility – in a nutshell. Theory and practice. Einsiedeln: [s. n.], 2022. 423 p.
8. Lumped-circuits model of lossless transmission lines and its numerical characteristics / H. Zhou, T. Lu, S. Zhang, X. Zhang. *Front. Energy Res.* 2021. Vol. 9. P. 809434.
9. Mathematical Modelling of Transient Processes in a Three Phase Electric Power System for a Single Phase Short-Circuit / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies.* 2022. Vol. 15, is. 3. P. 1126.
10. Morched A., Gustavsen B., Tartibi M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1999. Vol. 14, is. 3. P. 1032–1038.
11. Partitioned fitting and DC correction for the simulation of electromagnetic transients in transmission lines/cables / M. Cervantes, I. Kocar, J. Mahseredjian, A. Ramirez. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2018. Vol. 33, No. 6. P. 3246–3248.
12. Perzynski T., Levoniuk V., Figura R. Transient Electromagnetic Processes Analysis in High Voltage Transmission Lines during Two-Phase Short Circuits. *Sensors.* 2023. No. 1. P. 298.
13. Simonyi K. Theoretische Elektrotechnik. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1956. 842 p.

Стаття надійшла 20.01.2025

ОБҐРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ СТОЯКОВИХ ПІДШИПНИКІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Ярослав Марушчак, д. т. н., Іван Дробот, Дмитро Гречин, к. т. н.
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ya.marushchak@gmail.com; dim39.2017@gmail.com, hrechynd@ukr.net

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.105-111>

Марушчак Я., Дробот І., Гречин Д. Обґрунтування характеристик діагностування експлуатаційних показників стоякових підшипників турбогенераторів

Виявленню та усуненню несправностей потужних турбогенераторів (ТГ) присвячена значна кількість робіт. Слід відзначити, що суттєвий вплив на ефективну роботу ТГ мають його стоякові підшипники. Значна кількість аварій ротора зумовлена відмовами саме стоякових підшипників. Тому наше дослідження присвячене аналізу інформаційного забезпечення діагностування стоякових підшипників, яке надалі слугуватиме ухваленню рішення про їх стан ще до настання аварійної ситуації.

Відомо, що до стоякових підшипників мастило подається під тиском. Очевидно, що під час роботи ТГ відбувається потрапляння металевих включень у мастило підшипника, які опосередковано вказують на погіршення стану поверхні вкладишів підшипника. Крім того, порушення конструкції підшипникового вузла ТГ може проявлятися збільшенням вібрації. За їх величиною також опосередковано можна судити про стан цього вузла.

Отже, аналізуючи конструктивні особливості підшипників ТГ, а також фізичні процеси, що в них відбуваються, можна зробити висновок про можливість використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ для розпізнавання стану стоякового підшипника. З іншого боку, не має об'єктивної оцінки, вираженої у числовому представленні, того, що ці дві діагностичні ознаки дійсно є інформативними для розпізнавання станів стоякових підшипників ТГ.

Дана праця присвячена обґрунтуванню інформаційного забезпечення процедури діагностування стану підшипникових вузлів ТГ. Це можна вирішити за допомогою розрахунку величини інформації, яка відображає взаємозв'язок вибраних діагностичних ознак з технічним станом стоякових підшипників ТГ.

Величини інформації, які розраховані за результатами обстежень мастила і вібрації стоякового підшипника ТГ, показали, що обидві ці діагностичні ознаки є інформативними щодо його станів. Слід відзначити високі рівні інформації про непрацездатний стан стоякових підшипників, якщо проводиться обстеження за цими двома діагностичними ознаками. Таким чином, отримано об'єктивні підтвердження рекомендацій щодо обстеження стоякових підшипників ТГ за станом мастила та величиною вібрації корпусу стояка у числовому представленні.

Ключові слова: турбогенератор, стояковий підшипник, діагностична ознака, ентропія, величина інформації, працездатний стан, непрацездатний стан.

Marushchak Ya., Drobot I., Hrechyn D. Justification of the characteristics of diagnosing operational indicators of turbine generator standoff bearings

A significant amount of research has focused on detecting and eliminating malfunctions in powerful turbogenerators (TG). One important aspect to consider is the impact of standoff bearings on the effective operation of the TG. Failures in these bearings are responsible for a substantial number of rotor accidents. Therefore, this work analyzes the information support necessary for diagnosing standoff bearings, which will aid in assessing their condition before any emergencies arise.

It is known that grease is supplied to the standoff bearings under pressure. During the operation of the TG, metal inclusions can enter the bearing grease, indicating deterioration in the surface condition of the bearing liners. Additionally, any alterations to the design of the TG bearing assembly may also be reflected by an increase in vibration. This vibration can provide further insight into the assembly's condition.

By examining the design features of TG bearings and the physical processes at play, we can deduce that information regarding the presence of metal inclusions in the lubricant, alongside the vibration levels of the TG standoff bearing, can be used to assess its condition. However, there is currently no objective assessment, in numerical form, demonstrating that these two diagnostic features are indeed effective for evaluating the state of TG standoff bearings.

This work aims to justify the information support for the procedure used to diagnose the condition of TG bearing assemblies. This can be achieved by calculating the amount of information that reflects the relationship between the chosen diagnostic features and the technical condition of the TG standoff bearings.

The information derived from inspections of the lubricant and vibration of the TG bearing stands indicates that both diagnostic features are informative concerning their condition. Notably, high levels of information regarding the inoperable state of the standoff bearings are obtained when inspections focus on these two parameters. Thus, it is the objective confirmation of the

recommendation to inspect TG standoff bearings based on the condition of the lubricant and the magnitude of the housing vibration, represented in numerical terms.

Keywords: turbogenerator, standoff bearing, diagnostic feature, entropy, amount of information, working conditions, inoperable state.

Постановка проблеми. Процес вироблення електроенергії тепловими й атомними електростанціями передбачає декілька перетворень різних видів енергії, зокрема перетворення теплової енергії пари в механічну енергію обертання турбіни та ротора генератора, а також перетворення механічної енергії в електричну [3; 8–9; 11]. Ці два процеси відбуваються в турбогенераторах (ТГ). Тому ТГ є ключовими елементами в технологічному процесі відповідних електростанцій.

Провідним виробником ТГ в Україні є завод «Електроважмаш». На ньому виробляють ТГ широкого спектра, зокрема: турбогенератори ТГВ-200-2П потужністю 220 МВт, призначені для роботи в режимах пікових навантажень; турбогенератори ТА-6-2, ТА-12-2, ТА-15-2 потужністю 6, 12 і 15 МВт відповідно, призначені для автономних електростанцій, а також більш потужні агрегати для теплових та атомних електростанцій.

Турбогенератор складається з двох базових компонентів – статора і ротора. Ротор є обертовою частиною генератора і на нього впливають динамічні механічні навантаження, а також електромагнітні та теплові навантаження. Статор, хоча є стаціонарною частиною турбогенератора, також піддається значним динамічним навантаженням. Все ж таки визначальними впливами на нього є електромагнітні, термічні та високовольтні впливи. Таким чином, стан ТГ залежить від електричних і механічних властивостей його конструктивних частин.

Для потужних ТГ використовують стоякові підшипники ковзання. Основними елементами підшипникового вузла ТГ є рухомий вал, цапфа і нерухомий вкладиш підшипника. Вкладиш сталевий, а його внутрішня поверхня, яка є поверхнею тертя, виготовлена з набагато м'якшого матеріалу – бабіту. Змащення підшипника примусове. Мастило подається під тиском. Очевидно, що під час роботи ТГ відбувається потрапляння металевих включень у мастило підшипника, які опосередковано вказують на стан поверхні вкладишів підшипника. Візуальний контроль зливу мастила здійснюється через скло на оглядовому патрубку зливу. Тим самим періодичний доступ до візуального аналізу мастила нескладно реалізувати.

Порушення конструкції підшипникового вузла ТГ може проявлятися і збільшенням вібрації [14]. Ці вібрації передаються на стояк підшипника.

За їх величиною також опосередковано можна судити про його стан.

Аналізуючи конструктивні особливості підшипників ТГ, а також фізичні процеси, що в них відбуваються, можна дійти висновку про можливість використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ для розпізнавання стану вкладишів підшипника. З погляду технічної діагностики ці характеристики називаються діагностичними ознаками [2].

З іншого боку, немає об'єктивної оцінки, вираженої у числовому представленні, того, що ці дві діагностичні ознаки дійсно є інформативними для розпізнавання станів стоякових підшипників ТГ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виявленню та усуненню несправностей ТГ присвячена значна кількість робіт. Вони охоплюють проблеми, які виникають у конструкціях механічного обладнання [1; 6; 12–15], конструктивних струмопровідних елементах [10], пневмо- та гідросистемах [7] тощо. У працях [7; 10] проаналізовано найбільш характерні відмови вузлів ТГ в процесі їх тривалої експлуатації. На основі статистичного аналізу даних було встановлено, що в цілому по ТГ на статор припадає 23 % аварій, на масляне ущільнення вала – 21 %, на систему збудження – 18 %, на ротор і щітково-контактний вузол – по 14 % відповідно, а на газоохолоджувач припадає 10 % аварійний відмов. Кожен із цих чинників потребує детального аналізу для виявлення технічного стану як окремих конструктивних елементів, так і ТГ загалом. Особливо важливим є вирішення проблеми своєчасного виявлення тенденції переходу із працездатного стану до непрацездатного ще до настання аварійної ситуації. Слід зауважити, що ухвалення рішення про їх стан відбувається в умовах обмеженої інформації через складність, а часто навіть неможливість проводити відповідні вимірювання під час роботи ТГ.

Своєю чергою, у праці [8] показано, що значний вплив на роботу ТГ мають стоякові підшипники, які забезпечують функціонування ротора. Вище відзначено, що кількість аварій ротора перебуває на четвертому місці серед усіх аварій ТГ. Серед них значна кількість зумовлена відмовами саме стоякових підшипників. Тому наша праця

присвячена аналізу інформаційного забезпечення діагностування стоякових підшипників, яке надалі слугуватиме ухваленню рішення про їх стан ще до настання аварійної ситуації.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування інформаційного забезпечення процедури діагностування стану підшипникових вузлів ТГ. Це можна вирішити за допомогою розрахунку величини інформації, яка відображає взаємозв'язок вибраних діагностичних ознак з технічним станом стоякових підшипників ТГ.

Виклад основного матеріалу. Для обґрунтування можливості використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ (діагностичних ознак) використаємо деякі положення з теорії інформації, зокрема поняття ентропії.

Це поняття обґрунтоване в працях Вінера і Шеннона. Ентропія отримала застосування і в інших галузях науки як загальна теорія зв'язку стохастичних систем [4; 5].

Ентропія характеризує ступінь невизначеності системи. Нехай розглядається система A , яка може мати n випадкових станів A_1, A_2, \dots, A_n з ймовірностями $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$. Якщо один із станів системи обов'язково реалізується, а два стани одночасно неможливі (повна група несумісних подій), то:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1. \quad (1)$$

Саме такі системи і розглядаються в подальшому для аналізу станів стоякових підшипників.

У теорії інформації ступінь невизначеності системи A , яка має n можливих станів з ймовірностями $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$, розраховується, як

$$H(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \log \frac{1}{P(A_i)} = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log P(A_i). \quad (2)$$

Величина $H(A)$ введена Шенноном і називається ентропією системи. Позначення $H(A)$ не є позначенням функції. $H(A)$ означає, що ентропія H відноситься до стохастичної системи A . Оскільки ймовірності станів системи $0 \leq P(A_i) \leq 1$, то значення ентропії є додатною величиною.

У формулі (2) логарифм може бути взятий при будь-якій основі. Зміна основи логарифма приводить тільки до появи множника, тобто до зміни значення одиниці вимірювання.

Ентропію системи зручно визначати за допомогою двійкових логарифмів, тобто

$$H(A) = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i). \quad (3)$$

Якщо прийняти $P(A_i) = 1$, то ймовірності решти станів будуть нульовими (система

детермінована). Очевидно, що такій системі не властива невизначеність, що й підтверджується значенням $H(A) = 0$, розрахованим з використанням виразу (3).

Розрахуємо ентропію для випадку: $P(A) = 0,6$; $P(A_2) = 0,4$. Тут уже йдеться про стохастичну систему. Отже,

$$H(A) = - P(A_1) \log_2 P(A_1) - P(A_2) \log_2 P(A_2) = - \frac{3}{5} \log_2 \frac{3}{5} - \frac{2}{5} \log_2 \frac{2}{5} = 0,97.$$

Якщо розглянути ентропію системи, що має два рівноймовірні стани, тобто $P(A_1) = P(A_2) = 0,5$, то згідно з виразом (3) отримаємо

$$H(A) = - P(A_1) \log_2 P(A_1) - P(A_2) \log_2 P(A_2) = - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1.$$

Ступінь невизначеності такої системи характеризується ентропією, рівною одиниці (для цього й використовуються двійкові логарифми). Тому одиницею ентропії є величина, що характеризує ступінь невизначеності системи, яка має два можливих, рівноймовірних значення. Її називають бітом (binary digit). Легко показати, для n рівноймовірних станів ентропія може розрахуватися як $H(A) = \log_2 n$.

Дуже часто інформація про систему A отримується за результатами спостереження за іншою системою B , яка пов'язана з A . Якщо прийняти, що система B є системою сигналів, котрі відображають стан основної системи A , то середнє значення інформації (інформативність системи B відносно системи A) можна розрахувати так:

$$J_A(B) = H(A) - H(A/B). \quad (4)$$

У правій частині цього виразу є різниця початкової ентропії $H(A)$ системи A і її ентропії $H(A/B)$ після отримання даних про стан системи сигналів B .

Пояснимо цей вираз на простому прикладі. Нехай якийсь об'єкт може перебувати у двох станах: працездатному і непрацездатному. Його обстежують за двома діагностичними ознаками: зміна його температури та тиск всередині об'єкта. Якщо надходить інформація про те, що у випадку зміни його температури нижче якогось порогового значення, то ймовірність перебування його в працездатному стані становить 0,5. У випадку отримання інформації про перевищення тиском свого порогового значення можна стверджувати (ймовірність рівна одиниці), що об'єкт перебуває в працездатному стані. Очевидно, що друге повідомлення несе більше інформації тому, що воно повністю усуває невизначеність стану об'єкта. Перевіримо це з використанням виразу (4). Знайдемо значення початкової ентропії $H(A)$ системи (об'єкта) та

ентропію системи за умови отримання інформації про величину тиску $H(A/B)$:

$$H(A) = -(0,5\log_2 0,5 + 0,5\log_2 0,5) = 1,$$

$$H(A/B) = -(1\log_2 1 + 0\log_2 0) = 0.$$

Тоді значення внесеної інформації $J_A(B) = 1$ біт. Тим самим отримали підтвердження твердження, що друге повідомлення несе більше інформації про стан об'єкта.

З урахуванням виразу ймовірності добутку двох залежних подій, вираз (4) можна представити так:

$$J_A(B) = H(A) + H(B) - H(AB). \quad (5)$$

Підставивши вирази ентропії у (5), після нескладних перетворень отримано загальну формулу [2] для розрахунку інформації, яку несе система сигналів B відносно стану системи A :

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i)P(B_j)}. \quad (6)$$

Тут прийнято, що система A (стан об'єкта) може перебувати в n станах, а система сигналів B характеризується m станами (кількість сигналів різної фізичної природи).

Для наочності та зручності розрахунку інформації на основі виразу (6), яку надалі можна буде використовувати для діагностики ТГ, дещо змінимо позначення величин цього виразу. Тим самим приведемо позначення величин у відповідність до усталених у технічній діагностиці позначень.

Систему A позначимо літерою D (діагноз об'єкта). Дуже часто розглядається два стани (діагнози) технічної системи: D_1 – працездатний стан; D_2 – непрацездатний стан. Тоді має місце рівність $n=2$. У загальному випадку кількість станів може бути більшою, ніж два, і вони зумовлені особливостями функціонуванням об'єкта.

Систему сигналів B надалі позначатимемо літерою k (діагностична ознака), якщо йдеться про

один сигнал, за яким здійснюється обстеження об'єкта. Можливі діапазони значень (розряди діагностичної ознаки) позначаються $k_1 k_2 \dots k_j \dots k_m$. Якщо діагностичних ознак є кілька, то вони утворюють вектор k .

Тепер формула (6) набуде такого вигляду:

$$J_D(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(D_i k_j) \log_2 \frac{P(D_i k_j)}{P(D_i)P(k_j)}. \quad (7)$$

Щоб скористатися виразом (7), необхідні статистичні дані попередніх обстежень цього об'єкта.

Стосовно вкладишів стоякових підшипників ТГ позначимо: D_1 – працездатний стан підшипника; D_2 – непрацездатний стан підшипника.

Спочатку проаналізуємо діагностичну ознаку k_1 – вміст металевих включень у мастилі підшипника. Тоді її розряди (можливі діапазони значень) позначатимемо, як $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1j}$.

За результатами попередньо проведених 50 обстежень (N) ТГ типу ТГВ 200 на Бурштинській ТЕС, було встановлено, що у 34 обстеженнях (N_1) стояковий підшипник був працездатним (стан D_1), а у 16 випадках (N_2) він був непрацездатним (стан D_2). Контроль діагностичної ознаки (вміст металевих включень у мастилі встановлювався за висновками експертів візуально через оглядове віконце, а після зупинки ТГ – у лабораторії) здійснювався за трьома розрядами, а саме: k_{11} – відповідає умові (0÷5) г/т (грам металевих включень на тонну мастила); k_{12} – відповідає умові (4÷8) г/т; k_{13} – відповідає умові > 8 г/т. У працездатних станах була виявлена ознака k_{11} 20 разів. Ознака k_{12} зустрічалася у 10 випадках, а ознака k_{13} – у 4 випадках. Непрацездатні стани супроводжувалися ознакою k_{12} у 4 випадках, а ознака k_{13} зустрічалася у 12 випадках. Ознака k_{11} не була виявлена.

Представимо цю апіорну інформацію в табл. 1.

Таблиця 1. Апіорна інформація обстежень стоякового підшипника ТГ

Table 1. A priori information of TG standoff bearing surveys

Діагностична ознака	Працездатний стан (D_1)	Непрацездатний стан (D_2)
k_{11}	20	0
k_{12}	10	4
k_{13}	4	12

Таблиця 2. Діагностична матриця обстеження мастила стоякового підшипника ТГ

Table 2. TG standoff bearing lubrication inspection diagnostic matrix

D_i	k_j			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{11})$	$P(D_i k_{12})$	$P(D_i k_{13})$	
D_1	0,40	0,20	0,08	0,68
D_2	0	0,08	0,24	0,32
$P(k_{1j})$	0,40	0,28	0,32	

На підставі даних, представлених у табл. 1, розрахуємо значення складових виразу (7). Так, $P(D_1) = N_1/N = 34/50 = 0,68$; $P(D_2) = N_2/N = 16/50 = 0,32$. Ймовірності виявлення відповідних розрядів діагностичної ознаки матимуть такі значення: $P(k_{11}) = 20/50 = 0,40$; $P(k_{12}) = 14/50 = 0,28$; $P(k_{13}) = 16/50 = 0,32$. Тепер розрахуємо значення ймовірностей одночасної появи кожного зі станів разом з відповідним розрядом діагностичної ознаки (добуток двох подій): $P(D_1, k_{11}) = 20/50 = 0,40$; $P(D_1, k_{12}) = 10/50 = 0,20$; $P(D_1, k_{13}) = 4/50 = 0,08$; $P(D_2, k_{11}) = 0/50 = 0$; $P(D_2, k_{12}) = 4/50 = 0,08$; $P(D_2, k_{13}) = 12/50 = 0,24$. Зведемо отримані результати в табл. 2, яку ще називають [2] діагностичною матрицею.

Використовуючи дані, наведені в табл. 2, розрахуємо значення інформації, яка відображає вміст металевих включень у мастилі, для аналізу стану стоякових підшипників ТГ. Для зручності виконання обчислень згідно з виразом (7) перетворимо його до вигляду, в якому фігурують десяткові логарифми. Використавши властивість логарифмів переходу до іншої основи, перепишемо вираз (7) стосовно інформації обстеження стоякового підшипника:

$$J_D(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(D_i k_{1j}) \lg \frac{P(D_i k_{1j})}{P(D_i)P(k_{1j})} = \\ = \frac{1}{\lg 2} \left[0.4 \lg \frac{0.4}{0.68 \cdot 0.4} + 0.2 \lg \frac{0.2}{0.68 \cdot 0.28} + \right. \\ \left. + 0.08 \lg \frac{0.08}{0.68 \cdot 0.32} + 0 \lg \frac{0}{0.32 \cdot 0.4} + 0.08 \lg \frac{0.08}{0.32 \cdot 0.28} + \right. \\ \left. + 0.24 \lg \frac{0.24}{0.32 \cdot 0.32} \right] = 0.40.$$

Використовуючи формулу (7), можна розрахувати величину інформації відносно працездатного $J_{D1}(k_1)$ чи непрацездатного $J_{D2}(k_1)$ станів, яка міститься у даних про стан мастила:

$$J_{D1}(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{1j}/D_1) \lg \frac{P(D_1 k_{1j})}{P(D_1)P(k_{1j})}, \\ J_{D2}(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{1j}/D_2) \lg \frac{P(D_2 k_{1j})}{P(D_2)P(k_{1j})}.$$

Значення умовної ймовірності $P(k_{1j}/D_i)$, котра є у цих виразах, може бути знайдене з виразу ймовірності добутку двох залежних подій: $P(D_i k_{1j}) = P(D_i) P(k_{1j}/D_i)$.

Проведені розрахунки показали, що $J_{D1}(k_1) = 0.18$, $J_{D2}(k_1) = 0.88$. Порівнюючи отримані результати, можна стверджувати, що обстеження мастила стоякового підшипника ТГ є інформативним щодо його стану. Особливо це стосується непрацездатного стану, для якого величина інформації за цією діагностичною ознакою є найбільшою. Тим самим отримано підтвердження

доцільності аналізу вмісту металевих включень у мастилі для аналізу стану вкладишів стоякового підшипника.

Розрахуємо тепер величину інформації, яку вносять дослідження вібрації корпусу стоякового підшипника ТГ. Позначимо цю діагностичну ознаку k_2 .

Скористаємося з отриманих раніше результатів обстеження 50 ТГ. Одночасно з аналізом мастила проводився аналіз величини вібрацій корпусу стоякового підшипника, виміряних вбудованим у ТГ давачем вібрації (діагностична ознака k_2). Розряди k_2 позначимо $k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2j}, \dots$. Діапазон зміни вібрацій стояка підшипника розділимо на три інтервали. Це дає можливість скористатися виразами, які були отримані під час аналізу інформації за ознакою k_1 , яка також мала три розряди. Прийmemo, що k_{21} відповідає вібрації ≤ 1.0 g, k_{22} відповідає значенням вібрації, що лежать у межах $(1.0 \div 2.0)$ g, k_{23} відповідає значенням вібрації > 2.0 g (тут g – прискорення сили земного тяжіння). Для результатів такого обстеження була сформована діагностична матриця, яка представлена у вигляді табл. 3.

Представивши вираз (7) стосовно величини інформації, отриманої за результатом обстеження вібрації стоякового підшипника, і використавши числові значення відповідних величин з табл. 3, отримаємо:

$$J_D(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(D_i k_{2j}) \lg \frac{P(D_i k_{2j})}{P(D_i)P(k_{2j})} = 0.415.$$

Розрахунок величини інформації стосовно працездатного і непрацездатного станів розраховується за виразами, аналогічними для обстежень мастила підшипника:

$$J_{D1}(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{2j}/D_1) \lg \frac{P(D_1 k_{2j})}{P(D_1)P(k_{2j})} = 0.531, \\ J_{D2}(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{2j}/D_2) \lg \frac{P(D_2 k_{2j})}{P(D_2)P(k_{2j})} = 0.935.$$

Для зручності проведення аналізу отриманих результатів представимо їх у табл. 4.

Як видно з даних, наведених у табл. 4, величини інформації, яка отримана за результатами обстежень мастила і вібрації стоякового підшипника ТГ, є практично однаковими. Це свідчить, що обидві ці діагностичні ознаки є інформативними щодо його станів. Слід відзначити високі рівні значень $J_{D2}(k_1)$ та $J_{D2}(k_2)$. Це означає, що інформація про результати обстеження за обома ознаками особливо цінна є для виявлення непрацездатного стану.

Таблиця 3. Діагностична матриця обстеження вібрації стоякового підшипника ТГ
Table 3. Diagnostic matrix of the TG standoff bearing vibration inspection

D_i	k_2			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{21})$	$P(D_i k_{22})$	$P(D_i k_{23})$	
D_1	0,4000	0,3000	0,0250	0,7250
D_2	0,0125	0,0625	0,2000	0,2750
$P(k_{2j})$	0,4125	0,3625	0,2250	

Таблиця 4. Значення інформації за результатами обстеження підшипників ТГ
Table 4. The meaning of information from the results of the TG bearing inspection

$J_D(k_1)$	$J_D(k_2)$	$J_{D_1}(k_1)$	$J_{D_1}(k_2)$	$J_{D_2}(k_1)$	$J_{D_2}(k_2)$
0.400	0.415	0.18	0.531	0.880	0.935

Тепер перевіримо правомірність використання математичного апарату на основі ентропії сигналу, який не корелюється зі станами, але був використаний для отримання результатів щодо стоякового підшипника ТГ. Для цього розглянемо випадок, коли прийнята якась діагностична ознака k_3 , котра не корелюється зі станом якось об'єкта. Стосовно стоякового підшипника ТГ це можуть бути якісь електричні, механічні, чи інші характеристики, котрі ніяк не пов'язані зі станом підшипників, наприклад: стан ізоляції обмоток, механічна міцність стояка, атмосферний тиск тощо. Вони можуть змінюватися, але ці зміни практично не пов'язані зі станом вкладишів стоякового підшипника. Якщо так, то під час обстежень такого об'єкта завжди буде виявлений якийсь один розряд (k_{31} , k_{32} , k_{3j}) ознаки k_3 , наприклад k_{31} . Якщо припустити під час якогось обстеження появу

іншого розряду, то така подія буде малоімовірною тому, що ця ознака не пов'язана з умовами функціонування даного вузла ТГ. У такому разі можемо стверджувати, що $P(k_{31})=1$, $P(k_{32})=P(k_{33})=\dots=0$. З цієї самої причини $P(D_i k_{32})=P(D_i k_{33})=\dots=P(D_i k_{3j})=0$.

Таким чином, під час обстеження підшипника ТГ діагностична ознака буде відображатися інтервалом (розрядом) k_{31} незалежно від того, чи має місце стан D_1 , чи D_2 . Це означає, що для всіх N обстежень ТГ k_{31} буде виявлено у всіх N_1 випадках появи стану D_1 , а також у всіх N_2 випадках появи стану D_2 . Тоді отримаємо: $P(D_1 k_{31})=N_1/N$; $P(D_2 k_{31})=N_2/N$. Очевидно, що $P(D_1 k_{31})=P(D_1)$, $P(D_2 k_{31})=P(D_2)$. Представимо діагностичну матрицю для цього випадку у вигляді табл. 5, обмежившись трьома розрядами діагностичної ознаки, як це було у табл. 2 і табл. 3.

Таблиця 5. Діагностична матриця для випадку діагностичної ознаки, некорельованої зі станом об'єкта
Table 5. Diagnostic matrix for the case of a diagnostic feature uncorrelated with the state of the object

D_i	k_3			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{31})$	$P(D_i k_{32})$	$P(D_i k_{33})$	
D_1	N_1/N	0.00	0.00	N_1/N
D_2	N_2/N	0.00	0.00	N_2/N
$P(k_{3j})$	1.00	0.00	0.00	

Очевидно, що складові виразу (7) з нульовими значеннями співмножників $P(D_i k_{32})$, $P(D_i k_{33})$ будуть також нульовими. Знайдемо значення тих складових, де співмножники є ненульовими, а саме:

$$\begin{aligned}
 & P(D_1 k_{31}) \lg \frac{P(D_1 k_{31})}{P(D_1)P(k_{31})} \\
 & + P(D_2 k_{31}) \lg \frac{P(D_2 k_{31})}{P(D_2)P(k_{31})} \\
 & = \frac{N_1}{N} \lg \frac{N_1/N}{(N_1/N) \cdot 1} + \frac{N_2}{N} \lg \frac{N_2/N}{(N_2/N) \cdot 1} \\
 & = \frac{N_1}{N} \lg 1 + \frac{N_2}{N} \lg 1 = 0.
 \end{aligned}$$

Отже, величина інформації $J_D(k_3)=0$. Таким чином, отримано підтвердження очевидного факту, що обстеження будь-якого об'єкта за некорельованою з його станом діагностичною ознакою не має сенсу. Це підтвердження отримано за результатом строгого математичного доведення.

Висновки. Отримано об'єктивні підтвердження рекомендацій щодо обстеження стоякових підшипників ТГ за станом мастила та величиною вібрації корпусу стояка. Саме такі обстеження є найбільш інформативними щодо можливого

непрацездатного стану. На це вказують значення інформації $J_{D2}(k_1) = 0.880, J_{D2}(k_2) = 0.935$.

Доведено, що величина інформації, отриманої за результатами обстеження діагностичної ознаки, яка не корелюється зі станом об'єкта $J_D(k_3)=0$. Це слугує об'єктивною підставою, щоб такі діагностичні ознаки не брати до уваги в процесі діагностування.

Розглянута методика оцінки інформативності діагностичних ознак дає можливість об'єктивно здійснити порівняльний аналіз характеристик різної фізичної природи у числовому представленні. Такий підхід може бути застосований до оцінки інформативної цінності обстежень не тільки за двома діагностичними ознаками, а й за більшою їх кількістю.

Бібліографічний список

1. Аналіз причин пошкодження турбогенераторів і гідрогенераторів путём определения сложно напряжённого состояния деталей / К. А. Кобзарь, А. Ю. Шуть, Е. А. Овсянникова, А. В. Сенцкий, А. В. Третьяк. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8(1180). С. 136–142.
2. Василевич Л.Ф., Маловик К.Н., Смирнов С.Б. Количественные методы принятия решений в условиях риска. Севастополь: СМУЯэиП, 2006. 232 с.
3. Василів К. М. Експлуатація електричних станцій: навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2022. 236 с.
4. Драган Я., Сікора І., Яворський Б. Шеннонова міра інформації і теорія сигналів. *Вісник державного університету «Львівська політехніка»*. 2000. № 387. С. 21–30.
5. Мельник А. О., Голембо В. А., Бочкарьов О. Ю. Наукова спадщина засновника кібернетики Норберта Вінера. Комп'ютерні системи і мережі. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2019. № 1, т. 1. С. 1–8.
6. Методы определения напряженно-деформированного состояния коробов турбогенераторов в трехмерной постановке и их верификация на стенде завода / А. В. Третьяк и др. *East European Scientific Journal*. 2019. № 3(43), ч. 4. Р. 71–78.
7. Розроблення й впровадження перспективних методів розрахунку і моделювання при проектуванні та експлуатації потужних турбогенераторів та гідрогенераторів для ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС / К. О. Кобзар та ін. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2018. № 5 (1281). С. 38–45.
8. Шевченко В. В., Лізан І. Я. Визначення технічного стану турбогенераторів для встановлення необхідності їх реабілітації або заміни. *Вісник Харківського університету повітряних сил. Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2(42). С. 145–150.
9. Шевченко В. В. Основы электроэнергетики: учеб. пособие. Харьков: ФОП Панов А. М., 2019. 338 с.
10. Designing of high power turbogenerators / K. Kobzar, O. Tretiak, O. Ovsianykova, V. Polienko, P. Gakal. *Vestnik KazNRTU*. 2018. № 4 (128).
11. Korpela Seppo A. Principles of turbomachinery. The Ohio State University: Second edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2019. 565 p.
12. Modeling of the Stress–Strain of the Suspensions of the Stators of High-Power Turbogenerators / O. Tretiak et al. *Computation*. 2022. Vol. 10, No. 191. P. 1–13.
13. Peculiarities of three dimensional calculation of large units of generators by finite element methods / O. Tretiak, K. Kobzar, O. Shut', V. Polienko, P. Gakal. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2018. No. 5–6. P. 16–20.
14. Shumilov Y. A., Demidyuk B. M., Shtorgin A. V. Vibrodiagnostics as a component of monitoring the technical condition of power units. *Pract. Inst. Electrodyn. Natl. Acad. Sci. Ukr*. 2008. No. 19. P. 76–80.
15. Tretiak O. Peculiarities of Designing of Suspensions for Stators of High Power Turbogenerators. *Вісник НТУ «ХП»*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 12 (1288). С. 83–88.

Стаття надійшла 14.02.2025

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНТЕГРУВАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІОВАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДРОБОВОГО ПОРЯДКУ

Ярослав Марущак, д. т. н., Іван Дробот, Дмитро Гречин, к. т. н.

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ya.marushchak@gmail.com; dim39.2017@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.112-116>

Марущак Я., Дробот І., Гречин Д. Порівняльний аналіз способів реалізації інтегрувально-диференціовальних регуляторів дробового порядку

На сучасному етапі для моделювання дробових диференціовальних та інтегрувальних ланок в електромеханічних системах використовують пакет NINTEGER. Застосування спеціально розробленого пакету NINTEGER як додатка для пакету MATLAB Simulink дало змогу виконувати перші дослідження у сфері застосування регуляторів дробового порядку в системах автоматичного керування дробового порядку. Але йому властиві певні недоліки: пакет NINTEGER працює виключно в середовищі MATLAB Simulink і застосувати його за межами цього пакету неможливо; із літературних джерел невідома точність представлення дробових ланок та ПД регуляторів дробового порядку моделями у цьому пакеті.

У роботі здійснено порівняльний аналіз математичних моделей на основі відомого перетворення Оусталоупа у програмному середовищі MATLAB з можливістю його використання в MATLAB Simulink замість додатка NINTEGER. Досліджено точність моделей інтегрувальних і диференціовальних регуляторів дробового порядку у представленні Оусталоупа, Рімана, Рімана-Ліувіля і Грюнвальда-Летнікова порівняно з моделлю, отриманою за перетворенням Лапласа, як еталонною. На основі проведеного аналізу дійдено висновку, що найбільш перспективним для реалізації регуляторів є моделі, побудовані на основі перетворення Оусталоупа. Моделі Оусталоупа дозволяють замінити передавальні функції дробового порядку еквівалентними передавальними функціями цілого порядку. Завдяки цьому забезпечується значно вища швидкодія відпрацювання керуючих впливів порівняно з моделями Грюнвальда-Летнікова. Щодо точності, то вона дещо гірша, але цей недолік компенсується простотою обчислювальної процедури.

Ключові слова: моделі, перетворення Лапласа, перетворення Оусталоупа, передавальна функція дробового порядку, регулятори дробового порядку.

Marushchak Ya., Drobot I., Hrechyn D. Comparative analysis of the methods for implementing fractional-order integrator-differentiator controllers

At the present stage, the NINTEGER package is used for modeling fractional differential and integral elements in electromechanical systems. The application of the specially developed NINTEGER package as an add-on for the MATLAB Simulink package has enabled the first studies in the field of using fractional-order controllers in fractional-order automatic control systems. However, it has certain drawbacks: the NINTEGER package works exclusively in the MATLAB Simulink environment and cannot be used outside this package. The literature does not clarify the accuracy of representing fractional elements and fractional-order PID controllers in this package.

The work presents a comparative analysis of mathematical models based on the well-known Oustaloup transformation in the MATLAB programming environment with the possibility of its use in MATLAB Simulink instead of the NINTEGER application. In addition, a study was conducted on the accuracy of integral and differential regulators of fractional order represented in the Oustaloup, Riemann, Riemann-Liouville, and Grünwald-Letnikov forms compared to the model obtained through the Laplace transformation as a benchmark. Based on the conducted analysis, it is concluded that the models built on the Oustaloup transformation are the most promising for the implementation of regulators. Oustaloup models allow replacing fractional order transfer functions with equivalent transfer functions of integer order. This provides significantly higher performance in processing control influences compared to Grünwald-Letnikov models. Regarding accuracy, it is somewhat worse, but this drawback is compensated for by the simplicity of the computational procedure.

Keywords: models, Laplace transform, Oustaloup transform, fractional order transfer function, fractional order controllers.

Постановка проблеми. На сучасному етапі для моделювання дробових диференціовальних та інтегрувальних ланок в електромеханічних системах використовують пакет NINTEGER. Застосування спеціально розробленого пакету NINTEGER як додатка для пакету MATLAB Simulink дало змогу виконувати перші дослідження у сфері застосування регуляторів дробового порядку в

системах автоматичного керування САК з об'єктами керування дробового порядку. Але йому властиві певні недоліки: пакет NINTEGER працює виключно в середовищі MATLAB Simulink і застосувати його за межами цього пакету неможливо; із літературних джерел невідома точність представлення дробових ланок та ПД регуляторів дробового порядку моделями у даному пакеті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Нині дробове числення перебуває у процесі розвитку і в теоретичному плані, і в його застосуванні. Цей розділ матаналізу перетворився на інструмент математичного моделювання складних динамічних процесів у звичайних і фрактальних середовищах, який дозволяє на новій основі вирішувати різні задачі аналізу, синтезу, ідентифікації, діагностики, створення нових систем керування тощо [1; 3; 7]. Пониження порядку моделі стало останніми роками цікавою сферою досліджень, завдяки зростанню важливості синтезу для систем керування з дробовими регуляторами на основі контролерів [2], використовуючи різні стратегії. Водночас особливу увагу треба звертати на запобігання втрати найбільш важливих динамічних особливостей системи.

У сучасних літературних джерелах є різні підходи до реалізації інтегрально-диференціальних регуляторів дробового порядку, використовуючи різні моделі. Вони базуються на різних описах інтегрально-диференціальних ланок [3; 5; 6]. Основними формами дробового інтегрування є конструкції, запропоновані Ліувіллем і Ріманом. Розвиваючи теорію Ліувілля, Грюнвальд ввів поняття дробової похідної як границі різнищевих відношень. Представлення Рімана-Ліувілля передбачає, що функція спочатку диференціюється з найменшим цілим порядком n , який перевищує нецілий порядок j , а потім інтегрується з порядком $n - j$. Як показав досвід синтезу дробових регуляторів, для електромеханічних систем [6] нецілий порядок диференціальної складової не перевищує $j = 1$. Розвиток і корекція цієї теорії в царині електротехніки належить Хевісайду, Н. Вінеру та Дж. Карлсону.

Постановка завдання. Наше завдання – отримання числових значень точності відомих моделей інтегральних і диференціальних ланок дробового порядку для вироблення рекомендації щодо їх застосування під час реалізації відповідних регуляторів на базі мікроконтролерів.

Виклад основного матеріалу. Згадані недоліки пакету NINTEGER спонукали проаналізувати моделі у програмному середовищі MATLAB на основі відомих формул перетворення Оусталоупа, за використання яких інтегральний (s^{-a}) і диференціальний (s^{+a}) регулятори дробового порядку можна представити [4] виразом

$$s^{\pm a} = \frac{\omega_u \prod_{k=1}^N (1 + s/\omega_k)}{\omega_h \prod_{k=1}^N (1 + s/\omega_k)}, \quad (1)$$

де: $\omega_u = \sqrt{\omega_l \omega_h}$, N – порядок апроксимації (представлення), яким слід задатися; ω_k, ω_k – нулі та полюси еквівалентної передавальної функції (ПФ) цілого порядку, відповідно; $[\omega_l, \omega_h]$ – нижня і верхня межі зміни частоти.

Розраховані згідно з (1) значення нулів, полюсів та коефіцієнта підсилення апроксимуючої ПФ цілого порядку для $N=1,2,\dots,5$ були імплементовані в середовище MATLAB Simulink і забезпечили такі переваги порівняно з пакетом NINTEGER:

- розроблені моделі ланок доступні для використання не тільки в середовищі MATLAB Simulink, але і в програмному середовищі MATLAB;
- структура і параметри апроксимуючої ПФ за використання перетворення Оусталоупа відображаються в пам'яті MATLAB, що спрощує їх перегляд, дослідження і перевірку.

На рис. 1 і 2 показано перехідні функції розроблених моделей інтегрального і диференціального регулятора нецілого порядку в пакеті NINTEGER (крива 1) і за використання перетворення Оусталоупа порядку $N=3,4$ ($N=3$ – крива 2, $N=4$ – крива 3) з ПФ $s^{0.5}$ і $s^{-0.5}$, відповідно. Дослідження, проведені в [4] щодо можливостей апроксимації регуляторів дробового порядку передавальними функціями цілого порядку, показали, що представлення диференціального регулятора дробового порядку в пакеті NINTEGER із високим порядком апроксимації $N=5$ збігається за перехідними функціями з перетворенням Оусталоупа з порядком апроксимації вище ніж $N \geq 2$.

Щодо інтегральної ланки, то в перехідних функціях, отриманих за використання перетворення Оусталоупа (1), у зв'язку з рівністю порядків поліномів чисельника і знаменника є скачок, який не властивий інтегральному регулятору, тобто є суттєва неточність представлення на початковій ділянці перехідної функції. Для усунення цього ми запропонували модифікацію методу Оусталоупа для апроксимації ПФ дробового порядку ПФ цілого порядку, в якій порядок поліному чисельника зменшено на одиницю. Для дослідження точності такого представлення було проведено дослідження можливості нехтування одним нулем в отриманій ПФ цілого порядку шляхом пониження порядку полінома чисельника на одиницю або вилучення з нього елемента (доданка) з найвищим степенем

оператора s . Результати досліджень показали перевагу другого підходу (див. рис. 1, крива 4). Проте відкритим залишалося питання точності моделі Оусталоупа, адже порівняння проведені з результатами, отриманими в пакеті NINTEGER, які працюють тільки в середовищі MATLAB Simulink, де гіпотетично вони реалізовані. Тому для перевірки точності моделі Оусталоупа був здійснений наступний крок досліджень – пошук еталонних перехідних функцій інтегрального і диференціального регулятора. Враховуючи, що у перетворенні Лапласа відсутні процедури інтегрування і диференціювання, то перехідні функції, що розраховуються засобами аналітики такого перетворення, можна вважати найбільше наближеними до еталонних. Для підтвердження цього доцільно провести порівняння, отриманих в Mathcad, перехідних функцій за використання перетворення Лапласа з аналогічними перехідними функціями, отриманими в пакеті NINTEGER і за використання перетворення Оусталоупа з порядком апроксимації $N=3,4$, а також з його модифікацією для інтегровальної ланки.

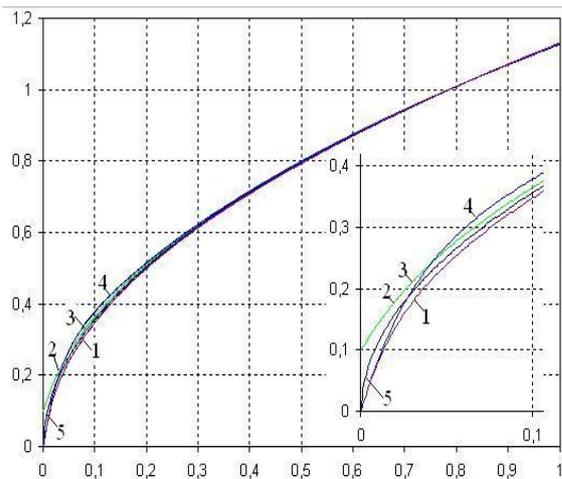


Рис. 1. Перехідні функції реалізації розроблених моделей інтегровального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{-0.5}$ в пакеті NINTEGER (крива 1) і на основі перетворення Оусталоупа порядку $N=3,4$ (криві 2, 3), модифікованого перетворення Оусталоупа порядку $N=3$ (крива 4) та перетворення Лапласа в пакеті Mathcad (крива 5)

Fig. 1. Transition functions of the implementation of the developed models of the fractional-order integrator controller with PF $s^{-0.5}$ in the NINTEGER package (curve 1) and based on the Oustaloup transform of order $N=3.4$ (curves 2, 3), the modified Oustaloup transform of order $N=3$ (curve 4) and the Laplace transform in the Mathcad package (curve 5)

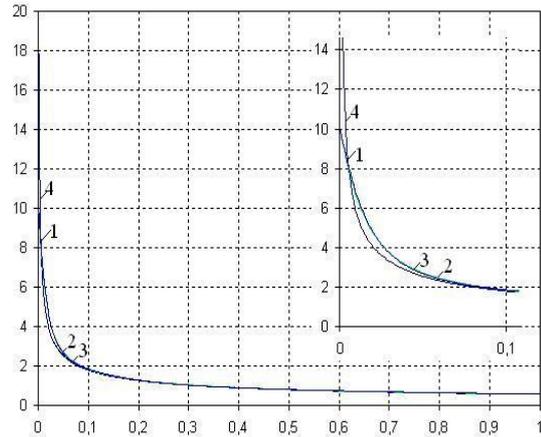


Рис. 2. Перехідні функції реалізації моделей диференціального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{0.5}$ в пакеті NINTEGER (крива 1), на основі перетворення Оусталоупа порядку $N=3,4$ (криві 2, 3) та перетворення Лапласа в пакеті Mathcad (крива 4)

Використавши відоме табличне обернене перетворення Лапласа, відображення дробового інтегровального регулятора з ПФ $s^{-\alpha}$

$$L^{-1} \left\{ \frac{1}{s^{\alpha}} \right\} = \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (2)$$

де Γ – гамма-функція, здійснюємо інтегрування його за часом

$$I(t) = \int_0^t \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} dt = \frac{t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha) \times \alpha} + C. \quad (3)$$

Аналогічно, використавши табличне обернене перетворення Лапласа, відображення дробового диференціального регулятора з ПФ s^{α} . Тоді у правій частині виразів (2)-(3) α замінюється на $-\alpha$.

На рис. 1, 2 показано розраховані за такими моделями перехідні функції (реакція на одиничний сигнал) інтегровального і диференціального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{-0.5}$ (див. рис.1, крива 5 і $s^{0.5}$ рис. 2, крива 4, відповідно). Отримані ці перехідні функції інтегровального і диференціального регулятора дробового порядку приймаємо за еталонні для дослідження точності інших моделей.

Для отримання оцінки точності апроксимації застосуємо:

- абсолютне середньоквадратичне відхилення, що розраховується за виразом

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ie})^2},$$

де y_i – значення досліджуваної перехідної функції в i -й точці; y_{ie} – значення еталонної перехідної функції ланки в i -й точці; $n=1001$ – кількість точок дискретизації перехідної функції;

- відносна похибка апроксимації перехідної функції (для інтегрувального регулятора), яка отримується за виразом:

$$d = \frac{s}{y_y} \times 100\% ;$$

де: y_y – усталене значення перехідної функції досліджуваної ланки при $t=1c$.

З метою пошуку раціонального варіанта моделей для реалізації цифрових інтегрувального і диференціального регуляторів дробового порядку було також проведено дослідження їх динамічних властивостей за використання представлень: Рімана, Рімана-Ліувілля і Грюнвальда-Летнікова, а також отримання оцінок точності збігу їх перехід-

них функцій із перехідними функціями, отриманими за використання перетворення Лапласа на основі моделі (3) для двох різних знаків α .

Результати оцінки точності апроксимації інтегрувальної та диференціальної ланок дробового порядку за їх представлення моделями в пакеті NINTEGER і на основі перетворення Оусталоупа у порівнянні з моделлю, отриманою за перетворенням Лапласа як еталонною, наведені в табл.

Були також розраховані перехідні функції для інтегрувального регулятора дробового порядку у представленні Рімана

$$D^{-\nu} f(x) =$$

$$= \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_c^x (x-t)^{\nu-1} f(t) dt + C(t), \quad (4)$$

і диференціального регулятора дробового порядку у представленні Рімана-Ліувілля [5]

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt}\right)^n \int_a^t \frac{f(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}}. \quad (5)$$

Таблиця. Результати оцінки точності апроксимації інтегрувальної та диференціальної ланок дробового порядку

Table. Results of the estimation of the approximation accuracy of the integrating and differentiating links of the fractional order

ПФ ланки	Представлення моделей ланок											
	Ninteger		Рімана		Рімана-Ліувілля		Грюнвальда-Летнікова		Оусталоупа			
									N=3		N'=3 (мод)	
	s	d, %	s	d, %	s	d, %	s	d, %	s	d, %	s	d, %
$S^{-0.5}$	0,00648	0,5731	$8 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	-	-	0,00572	0,506	0,00699	0,6201	0,008773	0,778
$S^{0.5}$	0,3147	-	-	-	$1,57 \cdot 10^{-7}$	-	0,07094	-	0,3135	-	-	-

Проведені розрахунки згідно з (4)-(5) показали високу точність цих методів (див. таблицю), але виявили такі проблеми:

- права межа інтегрування для виразів (4) і (5) дає ділення на «0»;

- розрахунок кожної наступної точки перехідного процесу інтегральної дробової ланки вимагає наявності всіх попередніх значень підінтегрувальної функції (вхідного сигналу процесу) починаючи з 0, тому кожна наступна точка вимагає більшого об'єму обчислень і, тим самим, зростає завантаження процесора.

Тривалість розрахунку перехідного процесу інтегрувального регулятора за моделлю Рімана і диференціального регулятора дробового порядку за моделлю Рімана-Ліувілля залежить від кроку інтегрування та потужності контролера.

Перехідні функції інтегрувального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{-0.5}$ у представленні Рімана і диференціального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{0.5}$ у представленні Рімана-Ліувілля показані на рис. 3 і рис. 4 (крива 2). Для порівняння на рис. 3 і рис. 4 (крива 1), відповідно, наведені також перехідні функції, отримані за використання зворотного перетворення Лапласа, які вважаємо еталонними.

У літературних джерелах, зокрема [5], присвяченим реалізації дробових регуляторів, найчастішими є посилання до моделі інтегродиференціального регулятора дробового порядку з ПФ $s^{\pm\alpha}$ у представленні Грюнвальда-Летнікова

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\hat{e} - a \hat{u}}{\hat{e} h \hat{u}} \hat{a} (-1)^j \left(\frac{\alpha}{j}\right) f(t-jh)$$

Перевагами такого представлення є:

- формула проста у використанні, тому що записана на основі скінченної суми, а не інтегралу;
- модель за представлення інтегровально-диференціовальних регуляторів формулою Грюнвальда-Летнікова забезпечує вищу, порівняно з наведеними вище моделями, швидкість обчислень;
- для представлення інтегровального чи диференціовального регулятора дробового порядку використовується одна і та ж формула, змінюється лише знак дробового порядку («+» для диференціатора, «-» для інтегратора).

Основним недоліком цієї моделі є те, що розрахунок перехідного процесу інтегровального чи диференціовального регулятора дробового порядку ускладнюється наявністю у формулі гама-функцій, намагання збільшення точності визначення яких збільшує час розрахунку перехідного процесу.

Були розраховані перехідні функції інтегровального з ПФ $s^{-0.5}$ і диференціовального з ПФ $s^{0.5}$ регуляторів дробового порядку, що розраховані у пакеті Mathcad у представленні Грюнвальда-Летнікова. Виявилось, що в перехідній функції інтегрального регулятора як і у випадку перетворення Оусталоупа (1), є скачок, який не властивий інтегральній ланці, тобто є її неточність представлення на початковій ділянці перехідної функції.

Результати оцінки точності апроксимації моделей інтегровального на основі інтеграла Рімана та диференціовального на основі диференціала Рімана-Ліувілля, а також інтегровального та диференціовального регуляторів дробового порядку в представленні Грюнвальда-Летнікова, у порівнянні з моделлю, отриманою за перетворенням Лапласа як еталонною, наведено в таблиці.

Висновки. 1. Найвищу ступінь збігу з еталонними, для інтегровального регулятора дробового порядку, забезпечує перетворення на основі представлення Рімана (середньоквадратичне відхилення перехідної функції становить $S = 8 \cdot 10^{-8}$ або $d = 7,1 \cdot 10^{-6} \%$ до усталеного значення при $t = 1c$), а

для диференціовального регулятора дробового порядку – Рімана-Ліувілля (середньоквадратичне відхилення перехідної функції становить $S = 1,57 \cdot 10^{-7}$)

2. Моделі інтегровального та диференціовального регуляторів дробового порядку на основі перетворення Грюнвальда-Летнікова мають вищу швидкодію порівняно з моделями Рімана і Рімана-Ліувілля, простішу реалізацію, проте поступаються їм у точності.

3. Найбільш перспективним для реалізації регуляторів є моделі, побудовані на основі перетворення Оусталоупа, які забезпечують значно вищу швидкодію порівняно з моделями Грюнвальда-Летнікова, лише незначно поступаються їм за точністю, що компенсується простотою обчислювальної процедури.

Бібліографічний список

1. Васильев В.В., Симак Л. А. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. Киев: НАН Украины, 2008. 256 с.
2. Марушак Я. Ю., Копчак Б. Л., Копчак Л. С. Регулятори дробового порядку в системах підпорядкованого регулювання напруги автономного асинхронного генератора. *Вісник НУЛП «Електроенергетичні та електромеханічні системи»*. 2013. № 763. С. 76–80.
3. Dzieliński, a., Sierociuk d., Sarwas G. Some applications of fractional order calculus. *bulletin of polish academy of sciences. Warsaw. technical sciences*. 2010. vol. 58 (4). P. 583–592.
4. Marushchak Y., Mazur D., Kwiatkowski B., Kopchak B., Kwater T., Koryl M. Approximation of Fractional Order $pi^lambda d^mu$ -Controller Transfer Function Using Chain Fractions. *Energies*. 2022. № 15. P. 4902.
5. Mehdi Dalir. Application of fractional calculus. *Applied Mathematical Sciences*. 2010. Vol. 4. № 21. P. 1021–1032.
6. Podlubny I. *Fractional Differential Equations/Mathematics in Science and Engineering*. 1999. Vol. 198. Academic Press. 340 p.
7. Fortuna, L., Graziani S., Muscato G., Nunnari G., Porto D. Approximation of High-Order Lumped Systems by using Non-Integer Order Transfer Functions. *Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED99)*, 1999. P. 2222–2230.

Стаття надійшла 10.02.2025

ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ МЕХАНІЗМУ ІЗ СИСТЕМАТИЧНИМ НЕДОВАНТАЖЕННЯМ

Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот, Маркіян Гошко, к. т. н., Роман Левус
Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: hrechynd@ukr.net, dim39.2017@gmail.com, m121314@ukr.net

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.117-121>

Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Левус Р. Вибір типу електроприводу для механізму із систематичним недовантаженням

У статті розкрито питання побудови та роботи подрібнювача кормів, схеми керування системи автоматизованого електроприводу. За сучасних умов роботи подрібнювача, враховуючи перебої з електропостачанням, багато підприємств використовує резервні джерела живлення, які мають обмежену потужність. Тваринницька галузь постійно потребує наявності кормів, а тому інколи необхідно здійснювати подрібнення при живленні від резервних джерел живлення. Для полегшення роботи резервного джерела живлення можна зменшити рівень навантаження подрібнювача. Проаналізовано інші типи подрібнювачів, будову та роботу схем керування системами автоматизованого електроприводу. Запропоновано провести модернізацію електроприводу завдяки заміні регулювання ввімкнення-вимкнення асинхронного двигуна введенням плавного регулювання навантаження за допомогою частотного керування швидкості обертання асинхронного двигуна механізму навантаження. А також для забезпечення роботи подрібнювача за умови живлення від джерела резервного живлення обмеженої потужності забезпечити ввімкнення основного двигуна подрібнювача на пониженому напругу за допомогою перемикачів обмоток на схему «зірка».

Побудовано модель запропонованої системи автоматизованого електроприводу подрібнювача з автоматизованою подачею продукції на подрібнення на базі частотного перетворювача. Проведено дослідження його роботи в номінальному режимі, а також при живленні за пониженої напруги живлення за схемою «зірка» та зменшеному сигналі завдання. Отримані графічні залежності перехідних процесів при зміні навантаження показали високу швидкодію системи автоматизованого електроприводу, що забезпечує можливість роботи системи електроприводу з високою продуктивністю.

Технологічний ефект від збільшення продуктивності подрібнювача при роботі в номінальному режимі – за рахунок високої швидкодії можна навантажувати електропривід до номінального навантаження, оскільки перевантаження дуже швидко відпрацьовуються системою автоматичного керування, а також забезпечення роботи подрібнювача за сучасних проблем з електропостачанням, а саме робота від джерела обмеженої потужності.

Ключові слова: електропривід, подрібнювач, перетворювач частоти, модель, графічна залежність.

Hrechyn D., Drobot I., Hoshko M., Levus R. Selecting the type of electric drive for a mechanism with systematic underloading

The paper discusses the design and operation of a feed grinder and the control scheme of an automated electric drive system. In modern operational conditions, many enterprises face power outages and utilize backup power sources with limited capacity. Given the livestock industry's constant need for feed availability, it sometimes becomes necessary to perform grinding operations while relying on these backup power sources. To facilitate the operation of the backup power source, it is possible to reduce the load on the grinder. The paper also analyzes other types of grinders, along with their structures and control schemes for automated electric drive systems. A proposal is made to upgrade the electric drive by replacing the on-off control of the asynchronous motor with smooth load control, achieved through frequency control of the motor's rotation speed. Additionally, to ensure the grinder operates effectively with a backup power source, it is recommended to connect the main motor to a reduced voltage by configuring the windings in a "star" circuit.

The work describes a developed model of the proposed automated electric drive system for a grinder, which includes an automated feeding mechanism based on a frequency converter. Research was conducted to evaluate its performance in both nominal operating mode and when supplied with reduced voltage according to the "star" configuration and a lower task signal. The graphical representations of transient processes during load changes demonstrated a high response speed of the automated electric drive system, which enables efficient performance.

The technological benefits of increased grinder productivity in nominal mode are attributed to this rapid response, allowing the electric drive to handle its nominal load effectively, as the automatic control system can quickly manage overload situations. Furthermore, the system ensures the grinder operates smoothly despite contemporary power supply challenges, particularly when running off a limited power source.

Keywords: electric drive, grinder, frequency converter, model, graphical dependence.

Постановка проблеми. Подрібнювач має три основні двигуни: головний двигун – це двигун подрібнювального механізму, два допоміжні двигуни – для завантаження та вивантаження. Рівень завантаження регулюється вмиканням та вимиканням двигуна механізму завантаження. Таким чином, регулювання є стрибкоподібним, і тому в дробарці завжди виникають ситуації перевантаження і недовантаження, що призводить до перегріву двигуна подрібнювача й перевантаження мережі через реактивний струм. Двигуни механізму завантаження часто піддаються прямому запуску, що також може прискорити поломки. Здебільшого двигун механізму розвантаження працює безперервно за невеликих навантажень.

Окрім того, за сучасних умов роботи подрібнювача, враховуючи перебої з електропостачанням, багато підприємств використовує резервні джерела живлення, які мають обмежену потужність. Тваринницька галузь постійно потребує наявності кормів, а тому інколи необхідно здійснювати подрібнення при живленні від резервних джерел живлення. Для полегшення роботи резервного джерела живлення можна зменшити рівень завантаження подрібнювача. При цьому основний двигун великої потужності працює неефективно з низькими коефіцієнтом корисної дії та коефіцієнтом потужності. Для забезпечення вищих значень техніко-економічних показників доцільно двигун перемкнути в режим «зірка».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електроприводи є одними з основних енергоспоживаючих пристроїв. Одним з найбільш енергоємних процесів у сільськогосподарському виробництві є виробництво кормів [1; 4; 7]. У цьому процесі використовується двигун потужністю близько 30 кВт. Для раціонального використання електроенергії та забезпечення належної якості продукції двигун має демонструвати високі техніко-економічні показники. Для цього повинні бути побудовані схеми й системи електроприводу, які забезпечують ці умови [1; 5]. Електродвигуни для навантажувальних механізмів часто будують за схемами увімкнення-вимкнення з використанням системи прямого пуску асинхронних двигунів. Цей спосіб має низку недоліків [2; 3; 6; 8; 9]: прямий пуск асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами; частий прямий пуск іноді призводить до встановлення двигунів з більшою потужністю, ніж це необхідно під навантаженням; низькі ККД і коефіцієнт потужності двигуна навантаження, оскільки малопотужні двигуни швидко виходять з ладу.

Основний двигун подрібнювача часто працює з низьким навантаженням через відсутність регулювання навантаження, що означає нераціональне використання встановленої потужності, низький ККД і низький коефіцієнт потужності [1; 5]. Усі ці недоліки вимагають модернізації таких систем керування. Наявні системи електроприводу мають низькі техніко-економічні показники, знижену надійність подрібнювачів та електроприводів, високі витрати на ремонт електрообладнання, підвищені втрати електроенергії та нераціональне використання встановленої потужності. Для того щоб знайти оптимальний режим роботи, тобто навантаження на номінальну потужність головного двигуна подрібнювача, необхідне автоматизоване і плавне регулювання навантаження. Для управління рівнем навантаження необхідно контролювати рівень навантаження на головний двигун. Залежно від значення регулюється швидкість подачі матеріалу в подрібнювач. Для якісної модернізації необхідно знати більше про способи завантаження, типи та електроприводи подрібнювачів і дробарок. Рівень використання електродвигунів визначає навантаження на мережу через реактивні струми. У сільському господарстві частка некерованих електроприводів перевищує 70 %. Для уникнення перевантажень по струму, потужність нерегульованих електроприводів часто завищують. Як наслідок, двигуни часто є недовантаженими і працюють з низьким ККД і низьким коефіцієнтом потужності.

Здебільшого в електроприводах сільськогосподарської техніки застосовують асинхронні двигуни. Для регулювання швидкості обертання електродвигунів використовуються частотні перетворювачі.

Постановка завдання. Наше дослідження присвячене обґрунтуванню схеми електроприводу. Необхідно проаналізувати побудову та особливості роботи аналогічних механізмів, запропонувати тип схеми автоматизованого електроприводу подрібнювача, побудувати модель запропонованого автоматизованого електроприводу й провести моделювання його роботи.

Виклад основного матеріалу. Ми проаналізували існуючі схеми регулювання завантаження подрібнювачів та дробарок. На нашу думку, доцільніше було б завантаження регулювати плавно залежно від споживаного струму. Для цього необхідно регулювати швидкість обертання двигуна завантажувального транспортера. Ми вирішили, що доцільно використати систему електроприводу перетворювач частоти – асинхронний двигун.

Для здійснення регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна використаємо перетворювач частоти, на який заведемо сигнал від'ємного зворотного зв'язку за струмом двигуна

подрібнювача. При збільшенні навантаження система автоматичного керування забезпечить зменшення подачі сировини, а при зменшенні споживаного струму, навпаки, збільшить.

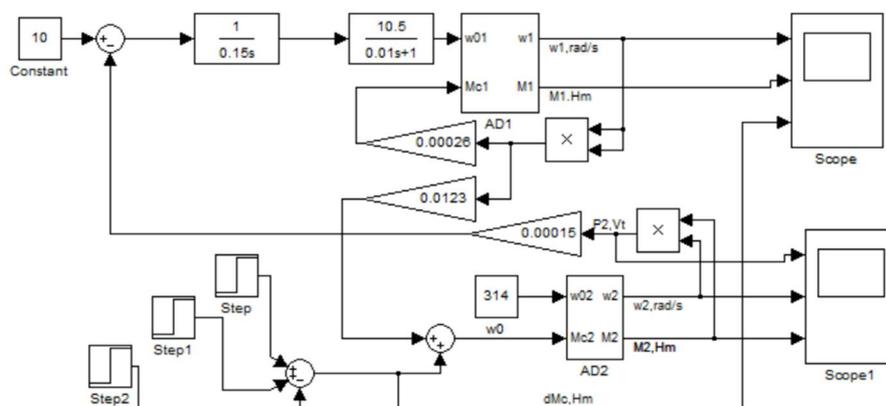


Рис. 1. Модель запропонованої системи автоматизованого електроприводу подрібнювача кормів
Fig. 1. Model of the proposed system of automated electric drive of the feed grinder

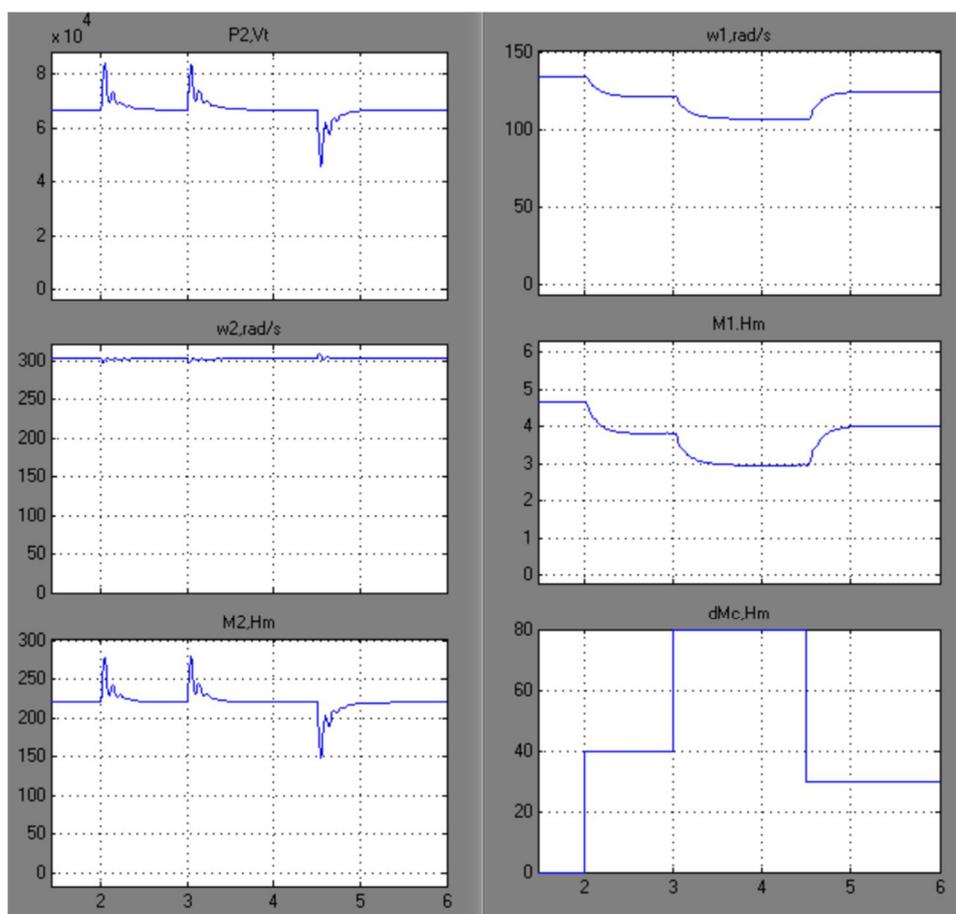


Рис. 2. Графічні залежності перехідних процесів при роботі у режимі, близькому номінального: потужність, кутова швидкість та момент АД2, кутова швидкість та момент АД1, моделювання зміни навантаження
Fig. 2. Graphical dependences of transient processes when operating in a mode close to nominal: power, angular velocity and torque AD2, angular velocity and torque AD1, modeling of load changes

Процес подрібнення кормів дуже енергоємний. Основним споживачем електроенергії є двигун подрібнювача. Ми пропонуємо для забезпечення його роботи в умовах обмеженої потужності джерела живлення обмежити рівень завантаження зменшенням сигналу завдання на електропривод механізму завантаження. Проте це призведе до зниження техніко-економічних показників основного двигуна великої потужності. Ми пропонуємо для такого механізму, який може систематично недовантажуватись, застосувати схему ввімкнення «зірка». У такому разі ми отримаємо зниження напруги живлення двигуна, що дозволить забезпечити вищі техніко-економічні показники.

Для цього в схемі електроприводу нам необхідно, крім зменшення сигналу завдання на завантажувальний двигуні, допрацювати схему

для перемикання у схему «зірка», яка зазвичай використовується як пускова для обмеження пускових струмів. Звичайно, таке рішення суттєво зменшить продуктивність установки, через це тривалість роботи механізму необхідно буде збільшити, проте процес виробництва не буде зупинений.

Для аналізу роботи запропонованої системи автоматизованого електроприводу ми побудували його структурно-математичну модель у математичному середовищі Matlab/Simulink (рис. 1).

Провели дослідження його роботи в режимі, близькому до номінального (рис. 2), а також при живленні за пониженої напруги живлення за схемою «зірка» та зменшеному сигналі завдання (рис. 3). Отримані графічні залежності перехідних процесів при зміні навантаження показали високу швидкодію системи автоматизованого електроприводу, що дає змогу роботі системи електроприводу з високою продуктивністю.

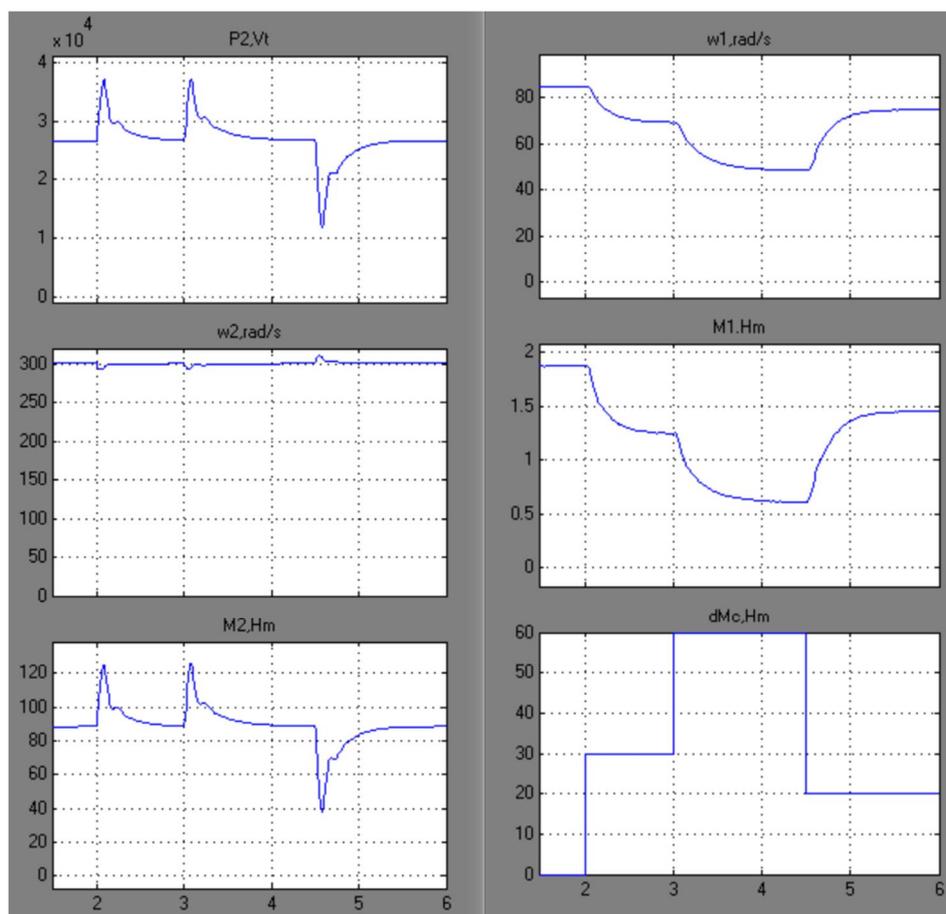


Рис. 3. Графічні залежності перехідних процесів при роботі у режимі при пониженій напрузі живлення: потужність, кутова швидкість та момент АД2, кутова швидкість та момент АД1, моделювання зміни навантаження

Fig. 3. Graphical dependences of transient processes when operating in the mode with reduced supply voltage: power, angular velocity and torque AD2, angular velocity and torque AD1, modeling of load changes

Висновки

1. У праці розкрито питання побудови й роботи подрібнювача кормів, схеми керування системи автоматизованого електроприводу. Проаналізовано інші типи подрібнювачів, будову та роботу схем керування системами автоматизованого електроприводу. До основних недоліків слід віднести регулювання рівня завантаження за допомогою ввімкнення-вимкнення двигуна завантажувального механізму.

2. Запропоновано провести модернізацію електроприводу способом заміни регулювання ввімкнення-вимкнення асинхронного двигуна введенням плавного регулювання завантаження за допомогою частотного керування швидкості обертання асинхронного двигуна механізму завантаження, що усуне зазначені недоліки існуючих схем електроприводів аналогічних механізмів.

3. Запропоновано для забезпечення роботи подрібнювача за умови живлення від джерела резервного живлення обмеженої потужності забезпечити ввімкнення основного двигуна подрібнювача на понижену напругу за допомогою перемикачів обмоток на схему «зірка», що дасть змогу працювати механізму в умовах систематичних перебоїв в електропостачанні.

4. Побудовано модель запропонованої системи автоматизованого електроприводу подрібнювача з автоматизованою подачею продукції на подрібнення на базі частотного перетворювача у математичному середовищі Matlab/Simulink.

5. Проведено дослідження роботи автоматизованого електроприводу на побудованій моделі в номінальному режимі, а також при живленні за пониженої напруги живлення за схемою «зірка» та зменшеному сигналі завдання. Отримані графічні залежності перехідних процесів при зміні навантаження показали високу швидкість системи автоматизованого електроприводу, що дає можливість роботи системи електроприводу з високою продуктивністю. Технологічний ефект від збільшення продуктивності подрібнювача при роботі в

номінальному режимі – за рахунок високої швидкодії можна завантажувати електропривід до номінального навантаження, оскільки перевантаження дуже швидко відпрацьовуються системою автоматичного керування, а також забезпечення роботи подрібнювача за сучасних проблем з електропостачанням, а саме робота від джерела обмеженої потужності.

6. Аналогічно можна використовувати запропоноване рішення регулювання завантаження, що виконують ввімкненням-вимкненням двигуна механізму подачі, а також застосування методу ввімкнення на понижену напругу за схемою «зірка» при живленні від джерела невеликої потужності інших механізмів.

Бібліографічний список

1. Браславський І. Я., Ішматов З. Ш. Реалізація енергоощадних технологій на основі регульованих асинхронних електроприводів. Київ: Електроінформ, 2003. 15 с.
2. Видмиш А. А., Бабій С. М., Петрусь В. В. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2012. 96 с.
3. Видмиш А. А., Трошин О. А. Теорія електропривода: лабораторний практикум: навч. посіб. Вінниця: ВДТУ, 2003. 135 с.
4. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Є. Л. Жулай, Б. В. Зайцев, Ю. М. Лаврінченко, О. С. Марченко, Д. Г. Войтюк. Київ: Вища освіта, 2001. 288 с.
5. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. Київ: Кондор, 2005. 408 с.
6. Колб А. А. Теорія електроприводу: навч. посіб. Донецьк: Нац. гірнич. ун-т, 2006. 511 с.
7. Матвійчук В. А., Стаднік М. І., Рубаненко О. О. Електропривод виробничих машин і механізмів: навч. посіб. з виконання курс. роботи. Вінниця: ВНАУ, 2016. 320 с.
8. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб. Київ: Либідь, 2005. 680 с.
9. Ярошенко Л. В. Лабораторний практикум з електропривода та електрообладнання: навч. посіб. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010. 192 с.

Стаття надійшла 05.02.2025

Розділ 6

НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

УДК 681.518:681.586:004.27:004.94

РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВОГО ГОДИННИКА-ТЕРМОМЕТРА НА ПЛАТФОРМІ ARDUINO З ІНДИКАЦІЄЮ НА MAX7219

*Олег Зачек¹, к. т. н., Андрій-Володимир Мідик¹, к. т. н., Ольга Лиса², к. т. н.,
Вадим Пташник², к. т. н.*

*¹Львівський державний університет внутрішніх справ,
вул. Городоцька, 26, м. Львів, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: zachekoi@gmail.com; andriy31194@gmail.com*

*²Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ovl2407@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.122-132>

Зачек О., Мідик А.-В., Лиса О., Пташник В. Розроблення цифрового годинника-термометра на платформі Arduino з індикацією на MAX7219

Представлено проєктування, програмну реалізацію та моделювання цифрового годинника-термометра на платформі Arduino Micro (ATmega32U4) з індикацією на модулі світлодіодних матриць 4×8×8 (FC-16) на базі драйверів MAX7219. Пристрій забезпечує відображення поточного часу та дати (RTC DS1307), температури в °C/°F (датчик LM35DZ), налаштування годинника й формату температури, прокручування тексту та керування яскравістю. Наведено апаратну схему в Proteus VSM, алгоритми та ключові програмні модулі (RTC, дисплей MAX7219, термометр LM35). Виконано моделювання в середовищі Proteus ISIS та досліджено макет, що підтвердило коректність роботи системи. Обговорено точність вимірювань, режими індикації, енергетичні та EMC-аспекти можливості масштабування. Цифровий пристрій розроблено на платформі Arduino Micro з МК AVR ATmega32u4, до якої підключено мікросхему годинника реального часу DS1307, прецизійний датчик температури LM35DZ та матричний світлодіодний дисплейний модуль 8x32 FC-16 з мікросхемами управління MAX7219 (дисплейний модуль із 4-х точкових світлодіодних матриць 8x8 і мікросхем управління MAX7219). Мікроконтролер зчитує час і дату з мікросхеми RTC DS1307, температуру навколишнього середовища з датчика LM35DZ та відображає (виводить) їх на матричному світлодіодному дисплеї. Пристрій має можливість налаштування поточного часу, дати, параметрів виводу. Розроблено електричну принципову схему та модель цифрового годинника-термометра засобами САПР Proteus. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення цифрового годинника-термометра в середовищі Arduino IDE. Проведено моделювання в емуляторі Proteus ISIS та дослідження макету цифрового годинника-термометра.

Результати роботи демонструють доцільність застосування MAX7219 для організації матричної індикації з мінімальною кількістю ліній керування та перспективність такого підходу для побудови побутових і навчальних вимірювальних пристроїв. У подальших дослідженнях доцільним є підключення додаткових сенсорів (вологість, тиск), реалізація бездротової синхронізації часу та оптимізація енергоспоживання.

Ключові слова: мікроконтролер AVR ATmega32u4, мікросхема RTC DS1307, прецизійний датчик температури LM35DZ, матричний світлодіодний дисплейний модуль 8x32 FC-16, мікросхема – драйвер MAX7219, САПР Proteus VSM.

Zachek O., Midyk A.-V., Lysa O., Ptashnyk V. Development of a digital clock-thermometer on the Arduino platform with MAX7219 display

The paper presents the design, software implementation, and modeling of a digital clock-thermometer based on the Arduino Micro (ATmega32U4) platform with indication on 4×8×8 (FC-16) LED matrix modules driven by MAX7219 chips. The device provides real-time display of the current date and time (RTC DS1307), temperature in °C/°F (LM35DZ sensor), clock and temperature format settings, text scrolling, and brightness control. The hardware schematic was developed in Proteus VSM, along with algorithms and key software modules (RTC, MAX7219 display, LM35 thermometer). Simulation in Proteus ISIS and testing of a physical prototype confirmed the correct operation of the system. Measurement accuracy, display modes, energy efficiency, EMC aspects, and scalability were analyzed. The digital device is based on the Arduino Micro platform with an AVR ATmega32U4 microcontroller, interfaced with a DS1307 real-time clock, a precision LM35DZ temperature sensor, and an 8×32 FC-16 LED matrix display module consisting of four 8×8 matrices with MAX7219 drivers. The microcontroller reads date and time from the RTC DS1307, the ambient temperature from the LM35DZ sensor, and outputs this information to the LED matrix display. The device supports adjustment of current time, date, and display

parameters. The work includes the development of the circuit schematic and the digital clock-thermometer model using Proteus CAD tools. The software and algorithms were implemented in the Arduino IDE. Simulation in Proteus ISIS and prototype testing confirmed system functionality.

The results demonstrate the feasibility of using MAX7219 drivers for matrix display control with minimal I/O lines and highlight the potential of this approach for household and educational measuring devices. Future research should focus on integrating additional sensors (humidity, pressure), implementing wireless time synchronization, and optimizing power consumption.

Keywords: AVR ATmega32U4 microcontroller, RTC chip DS1307, precision temperature sensor LM35DZ, 8×32 LED matrix display module FC-16, driver chip MAX7219, CAD software Proteus VSM.

Постановка проблеми. Цифрові годинники-термометри широко застосовують у побуті, промислових автоматизованих системах, лабораторному обладнанні та навчальних стендах. Вони забезпечують одночасний контроль часу та температури, що є критично важливим для низки технологічних процесів. Проте підходи до реалізації таких пристроїв мають низку обмежень.

Типові проблеми, що виникають під час побудови цифрових годинників із використанням світлодіодних індикаторів, можна сформулювати так:

- значна кількість ліній керування – при підключенні багатосегментних дисплеїв мікроконтролер витрачає велику кількість виводів, що обмежує масштабування системи;

- необхідність у потужних драйверах сегментів — пряме керування LED-матрицями потребує додаткових транзисторних ключів або спеціалізованих мікросхем;

- постійне навантаження на мікроконтролер – для реалізації динамічної індикації необхідно виконувати безперервне опитування та оновлення дисплеїв, що зменшує продуктивність системи і ускладнює реалізацію додаткових функцій.

Використання спеціалізованих контролерів індикації MAX7219/MAX7221 дозволяє суттєво спростити апаратну частину, мінімізувати кількість виводів мікроконтролера для керування дисплеєм, реалізувати каскадування модулів без значного ускладнення програмного забезпечення.

Водночас, для цифрового годинника-термометра актуальними залишаються такі завдання:

- забезпечення стабільної роботи годинника реального часу (RTC DS1307) при можливих збуреннях живлення;

- точність і надійність температурних вимірювань на основі аналогового давача (LM35DZ) з корекцією похибок;

- розробка компактного, модульного та енергоефективного пристрою, здатного працювати як автономно, так і в складі більших систем моніторингу.

Отже, актуальна розробка цифрового годинника-термометра з використанням мікроконт-

ролерної платформи Arduino та драйверів MAX7219, що дозволить поєднати простоту апаратної реалізації, гнучкість індикації та високу точність часових і температурних вимірювань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні розробки годинників-термометрів на базі мікроконтролерів Arduino демонструють тенденцію до використання спеціалізованих драйверів MAX7219/MAX7221 для керування світлодіодними індикаторами. Застосування цих мікросхем зменшує кількість ліній керування та спрощує каскадування матричних модулів 8×8, забезпечуючи стабільну яскравість і відсутність мерехтіння навіть за великої кількості сегментів [14].

Сучасні мікроконтролерні вимірювальні системи будуються за модульним принципом, що передбачає розділення функцій збору даних, обробки та індикації. У праці [7] проаналізовано архітектуру вбудованих систем моніторингу, де показано, що використання спеціалізованих периферійних модулів (RTC, драйвери дисплеїв) дозволяє суттєво зменшити навантаження на центральний процесор та підвищити стабільність роботи системи. Водночас автори [7] відзначають, що більшість експериментальних систем не супроводжується кількісною оцінкою точності та довготривалої стабільності, що обмежує можливість їх застосування у вимірювальних пристроях з підвищеними вимогами до надійності.

У дослідженні [10] наголошено важливість апаратної часової синхронізації у вбудованих системах реального часу. Однак застосування високоточних рішень часто ускладнює апаратну реалізацію та підвищує вартість системи, що є критичним для навчальних і побутових пристроїв.

У підсистемі часу традиційно використовується мікросхема DS1307, що працює по шині I²C та забезпечує базову точність. Однак численні дослідження та прикладні розробки показують залежність її стабільності від зовнішнього кварца й температурних факторів. Тому для задач із підвищеними вимогами до точності все частіше застосовують DS3231 із вбудованим температурно-компенсованим кварцовим генератором (TCXO),

похибка якого становить лише кілька ppm [12; 13].

Проблема дрейфу годинника реального часу є предметом численних досліджень. У статті [20] детально проаналізовано температурні та вікові похибки кварцових генераторів, які є основним джерелом нестабільності RTC-модулів. Порівняльні дослідження RTC із температурною компенсацією та без неї, наведені у праці [9], показують, що модулі класу DS3231 забезпечують на порядок менший дрейф порівняно з традиційними рішеннями типу DS1307. Водночас зазначено, що в багатьох прикладних розробках використання менш точних RTC є виправданим за умови періодичної корекції часу або короткотривалого режиму роботи пристрою. Критичний аналіз цих робіт свідчить, що експериментальні перевірки часто проводяться в лабораторних умовах без урахування реальних змін температури та живлення, що знижує практичну цінність отриманих результатів.

Для вимірювання температури активно застосовують аналоговий датчик LM35, що забезпечує лінійну характеристику $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ і не потребує складної обробки сигналу. Його використання розглянуто у практичних роботах і публікаціях, однак дослідники наголошують на доцільності врахування похибки АЦП та застосування калібрування або цифрової фільтрації [19]. У сучасних пристроях також все частіше застосовують цифрові датчики DS18B20 або SHT-серії, проте LM35 зберігає популярність у бюджетних рішеннях. У статті [18] досліджено характеристики аналогових температурних сенсорів у поєднанні з мікроконтролерними АЦП. Показано, що лінійність сенсорів типу LM35 є достатньою для побутових і навчальних застосувань, однак точність вимірювань істотно залежить від шумів та стабільності опорної напруги. Подібні результати наведено у праці [21], де запропоновано застосування статистичного усереднення для підвищення повторюваності результатів вимірювань. Водночас автори зазначають, що збільшення кількості вимірів призводить до зростання енергоспоживання та затримок у системі. Отож, обирати температурний сенсор та алгоритми обробки даних треба з урахуванням компромісу між точністю, енергоспоживанням і складністю реалізації.

Із боку програмного забезпечення ключову роль відіграють відкриті бібліотеки: MD_MAX72XX та MD_Parola (для роботи з MAX7219/7221), а також RTCLib (для роботи з DS1307/DS3231). Вони значно скорочують обсяг користувацького коду, забезпечують зручний API і розширюють функціонал індикації та роботи з часом [1; 11].

Стандартизація комунікаційних протоколів SPI та I²C залишається фундаментальною базою для сумісності модулів. Специфікація I²C [16] детально регламентує часові параметри, підтягувальні резистори й особливості адресації, що визначає надійну роботу DS1307/DS3231 у багатовузлових системах.

Крім того, важливим етапом розробки є моделювання й тестування у середовищах типу Proteus VSM, що дозволяє поєднати емуляцію прошивки мікроконтролера з апаратними моделями індикаторів, RTC та датчиків. Це скорочує час налагодження та зменшує кількість апаратних ітерацій [8].

Отже, MAX7219/7221 суттєво зменшують складність індикації та дарують масштабованість; для каналу часу вибір між DS1307 і DS3231 визначається вимогами до точності/вартості; LM35 залишається практичним і недорогим, але виграє від акуратної роботи з АЦП та, за потреби, калібрування; відкриті бібліотеки та інструменти співмоделювання формують «короткий шлях» від задуму до стабільної реалізації. Аналіз публікацій, показує, що перелічені дослідження зосереджені переважно на окремих компонентах мікроконтролерних систем. Водночас комплексні експериментальні роботи, які поєднують аналіз стабільності RTC, точності температурних вимірювань та енергетичних характеристик індикації, залишаються обмеженими.

Постановка завдання. Наше завдання – створення цифрового годинника-термометра з використанням світлодіодних модулів FC-16 (4×8×8, драйвер MAX7219), який відображає дату, час та температуру в градусах Цельсія або Фаренгейта. Пристрій повинен підтримувати налаштування модуля реального часу (RTC), забезпечувати наочне та зручне представлення інформації завдяки ефектам плавної прокрутки тексту. Така система є актуальною як для побутових застосувань, так і для навчальних та лабораторних експериментів із мікроконтролерними платформами.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- Спроекувати апаратну частину пристрою. Основою обрано мікроконтролер Arduino Micro на базі ATmega32U4, який забезпечує достатні обчислювальні можливості та зручність програмування. До нього підключаються модуль RTC DS1307 для зберігання точного часу, датчик температури LM35DZ для вимірювань у режимі реального часу, світлодіодні модулі FC-16 (MAX7219) для відображення даних, а також кнопки для реалізації функцій користувацького керування.

- Розробити програмне забезпечення. Для керування індикацією застосовуються бібліотеки

MD_MAX72XX та MD_Parola, які дозволяють гнучко реалізувати відображення текстових повідомлень та ефекти прокрутки. Для роботи з RTC використовується бібліотека RTCLib, що забезпечує простий доступ до функцій встановлення та зчитування часу.

- Реалізувати програмні модулі вимірювання та форматування даних. Необхідно розробити алгоритми для зчитування даних з датчика LM35DZ, конвертації значень у °C та °F, а також функції для відображення дати й часу у зручному форматі. Додатково має бути реалізований інтерфейс налаштувань – встановлення часу та дати, вибір одиниць вимірювання температури.

- Виконати моделювання у середовищі Proteus VSM. За допомогою цього програмного комплексу перевіряють правильність схемних рішень, моделювання роботи пристрою та налагодження програмного забезпечення. Це дозволяє мінімізувати апаратні помилки та спростити створення фізичного макета.

- Проаналізувати результати роботи пристрою. Оцінюються ключові показники – точність вимірювання температури та часу, стабільність роботи RTC, енергоспоживання системи. Додатково враховуються можливості масштабування, електромагнітна сумісність (EMC) та перспективи інтеграції в більш складні інформаційно-вимірювальні системи.

Отже, послідовне вирішення поставлених завдань дозволяє створити багатофункціональний і

компактний цифровий годинник-термометр, який може використовуватися і як завершений пристрій, і як навчальний приклад застосування апаратно-програмних рішень на базі мікроконтролерів.

Вклад основного матеріалу. Розроблювальний цифровий пристрій повинен мати функції годинника і термометра. Пристрій має виводити поточний час і дату, значення температури в градусах Цельсія або Фаренгейта на матричний світлодіодний дисплей, також дозволяє налаштувати час і дату годинника реального часу DS1307.

На рис. 1 зображено запропоновану структуру цифрового годинника-термометра. Цифровий годинник-термометр містить як апаратне, так і програмне забезпечення. Апаратне забезпечення цифрового годинника-термометра складається з плати Arduino Micro на мікроконтролері ATmega32u4, який є головним модулем опрацювання даних, до якої підключено мікросхему годинника реального часу DS1307, аналоговий давач температури LM35DZ, матричний світлодіодний дисплейний модуль 4x8x8 FC-16 на базі мікросхем-драйверів управління MAX7219 і 4 кнопки. Вибір RTC DS1307 зумовлений навчально-демонстраційним характером розробки; меншою вартістю та широкою доступністю модуля; достатньою точністю для побутових і навчальних застосувань. Архітектура пристрою дозволяє без змін програмної логіки замінити DS1307 на DS3231, якщо цього вимагають підвищені вимоги до точності.

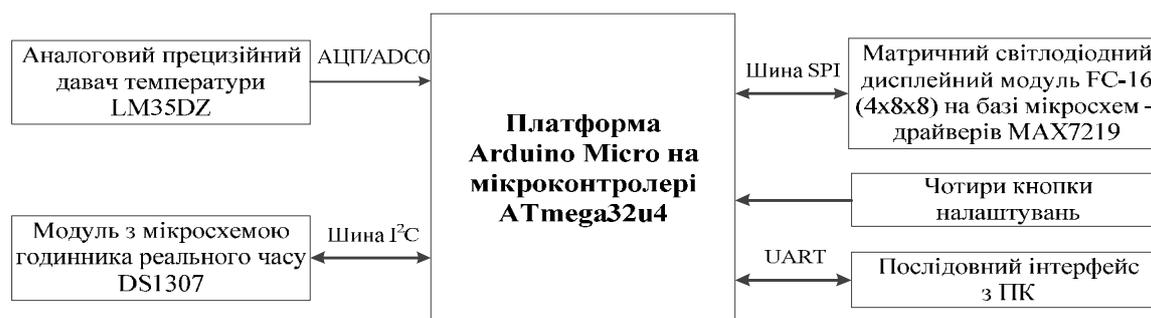


Рис. 1. Структура цифрового годинника-термометра

Fig. 1. Structure of a digital clock-thermometer

На рис. 2 зображено апаратне забезпечення цифрового годинника-термометра, спроектоване в системі автоматизованого проектування та моделювання електронних схем і програмованих пристроїв Proteus VSM. На схемі 4 світлодіодні модулі 8x8 підключено до мікросхем-драйверів управління MAX7219 U1...U4. Мікросхема-драйвер U1 MAX7219 підключена до плати Arduino по

інтерфейсу SPI. Вивід даних DIN мікросхеми підключено до виводу 11 (~PB3/MOSI/OC2A) DATA, вивід заціпки LOAD до виводу 10 (~PB2/SS/OC1B), а вивід синхронізації CLK до виводу 13 (PB5/SCK) плати Arduino Uno/Micro. Виводи DP, A, B, C, D, E, F, G мікросхеми-драйвера U1 з'єднано відповідно з виводами XA0, XA1, XA2, XA3, XA4, XA5, XA6, XA7, а виводи DIG0, DIG1,

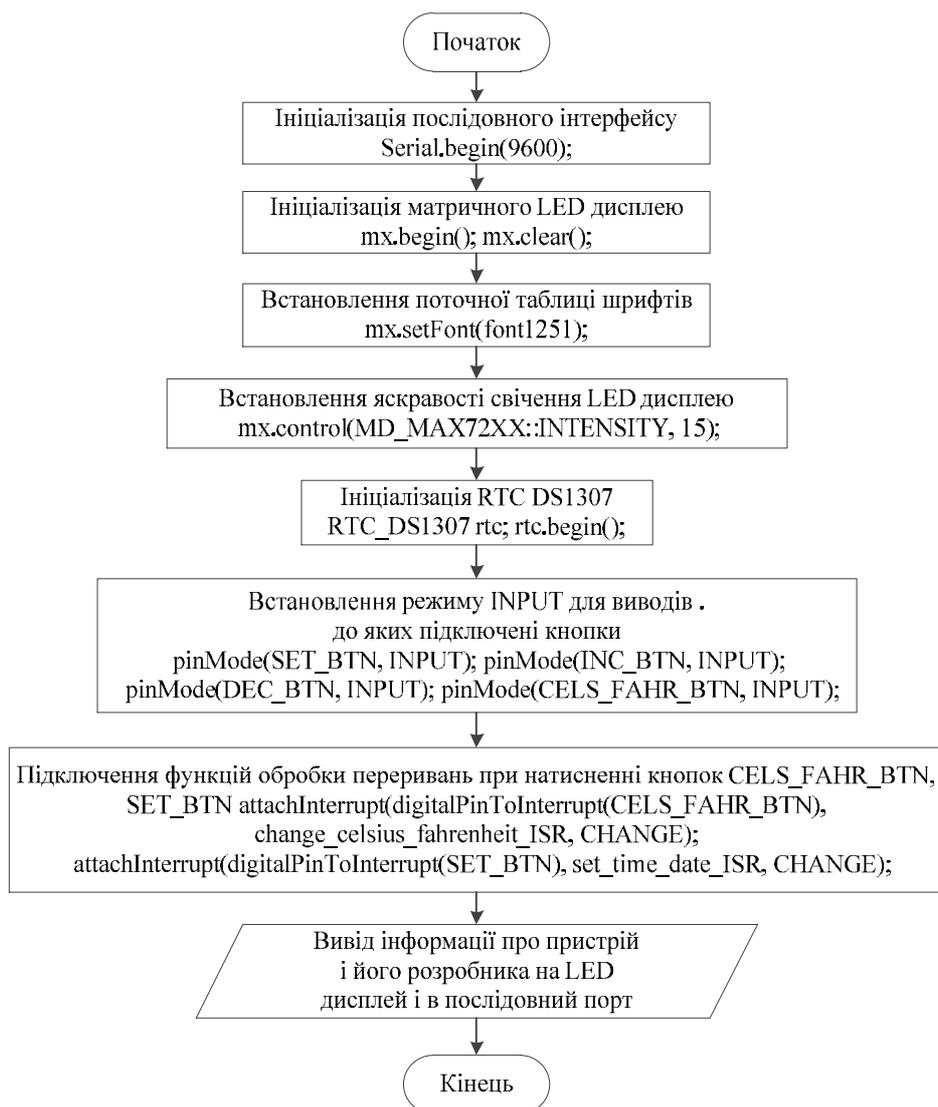


Рис. 3. Алгоритм функції ініціалізації setup() цифрового годинника-термометра
Fig. 3. Algorithm of the setup() initialization function of a digital clock-thermometer

При увімкненні пристрою стартує записана у флеш-пам'ять мікроконтролера ATmega32u4 програма.

Для отримання та виводу даних температури з датчика температури LM35DZ створено функцію void getTemp(). Щоб визначити температуру, спочатку потрібно виміряти напругу на виводах 2 і 3 датчика і перетворити їх на цифровий код із допомогою вбудованого в мікроконтролер АЦП. Вивід датчика 2 підключено до каналу A0/ADC0 АЦП, а вивід датчика 3 – до каналу A1/ADC1 АЦП. В Arduino для читання значень (цифрових кодів) АЦП для вимірюваних напруг із датчика температури здійснюється з використанням програмної функції analogRead(pin), де pin – номер порту аналогового входу, з якого буде здійснюватися зчитування

(A0..A5 для більшості плат Arduino, 0..7 для Mini і 0..15 для Mega):

```
int adcVal1 = analogRead(LM35_V1); //ADC
```

Read

```
int adcVal2 = analogRead(LM35_V2); //ADC
```

Read

Далі, прочитавши значення (цифрові коди) АЦП, знаючи його опорну напругу та роздільну здатність, обчислюємо еквівалентні значення напруг:

```
float adcVolt1 = adcVal1 * (ADC_VREF_V / ADC_RESOLUTION);
```

```
float adcVolt2 = adcVal2 * (ADC_VREF_V / ADC_RESOLUTION); // ADC_VREF_mV = 2.56V, ADC_RESOLUTION = 1024 for all volt measurement. R1= 56K, R2=5K;
```

Далі за формулою, знаючи значення напруг на виводах давача, віднявши значення `adcVolt1` від `adcVolt2` і помноживши на 100, отримаємо значення температури в градусах Цельсія:

```
float temp[2];
temp[0] = (adcVolt1 - adcVolt2)*100; // tempC
перетворюємо значення температури з Цельсія у
Фаренгейти;
temp[1] = temp[0] * 9/5 + 32; // tempF;
Serial.print(F("Temp: "));
Serial.print(temp[0]); // вивести температуру в
градусах Цельсія;
Serial.print(F("\xB0C, ")); // вивести символ
градуса;
Serial.print(temp[1]); // вивести температуру в
Фаренгейтах;
Serial.println(F("\xB0F")); // вивести знак
градуса;
//char units[] = {'C', 'F'};
if ((temp[cf] > 0 && temp[cf] > 10) || (temp[cf]
< 0 && temp[cf] < -10))
    sprintf(buf, "%x13%+d\x15",
round(temp[cf])); //, units[cf]);
else if ((temp[cf] > 0 && temp[cf] < 10) ||
(temp[cf] < 0 && temp[cf] > -10))
    sprintf(buf, "%x13%+d\x15",
round(temp[cf])); //, units[cf]);
if (!cf)
    strcat(buf, "C");
else
    strcat(buf, "F");
//sprintf(buf, "%x13%+d\x15\C",
round(tempC));
//dtostrf(tempC, 3, 1, buf);
//strcat(buf, "\x13\C");
}
```

Для роботи з мікросхемою годинника реального часу DS1307 використано бібліотеку `RTClib`, авторський внесок полягає у розробці прикладних програмних модулів і алгоритмів її використання, що містить клас `RTC_DS1307` із такими методами:

`bool begin (TwoWire *wireInstance=&Wire)` – встановлює підключення по шині I2C з DS1307 і повертає `true`, якщо зв'язок встановлено або `false`, якщо DS1307 не знайдено;

`void adjust (const DateTime &dt)` – встановлює задану дату і час у DS1307;

`uint8_t isrunning (void)` – перевіряє, чи працює годинник DS1307? Перевіряє біт `Clock Halt` в регістрі 0;

`DateTime now()` – отримує поточну дату і час з DS1307. Повертає об'єкт класу `DateTime`;

`static Ds1307SqwPinMode readSqwPinMode ()` – отримує значення поточного режиму роботи для піна SQW (CLKOUT);

`void writeSqwPinMode (Ds1307SqwPinMode mode)` – встановлює режим роботи для піна SQW (CLKOUT), який є виходом прямокутних імпульсів;

`uint8_t readnvram (uint8_t address)` – повертає байт, який зберігається в NVRAM за адресою `address`;

`void readnvram (uint8_t *buf, uint8_t size, uint8_t address)` – отримує значення з NVRAM в переданий буфер (масив) `buf`, починаючи з адреси `address` і наступні за ним адреси в кількості `size-1`;

`void writenvram (uint8_t address, uint8_t data)` – записує байт даних `data` в NVRAM за адресою `address`, `address` може приймати значення від 0 до 55, `data` – від 0 до 255;

`void writenvram (uint8_t address, const uint8_t *buf, uint8_t size)` – записує відразу декілька байтів в NVRAM. `address` – з якої адреси починається запис; `size` – кількість байтів для запису; `buf` – масив значень, які потрібно записати.

Для виводу інформації на матричний світлодіодний дисплей використано бібліотеку `MD_MAX72xx`, яка містить клас `MD_MAX72xx`.

У Proteus ISIS змодельовано повну схему з Arduino Micro/Uno, DS1307, LM35DZ, чотирма модулями 8×8 на MAX7219. Для перевірки коректності схемних рішень та програмної логіки цифрового годинника-термометра виконано моделювання у середовищі Proteus VSM, яке забезпечує сумісну емуляцію апаратної частини та виконання прошивки мікроконтролера. Перевірено: ініціалізацію дисплея (банери, шрифти, інтенсивність); відображення часу з миготінням двокрапки та секундами; прокрутку дати та дня тижня; відображення температури (°C/°F); процедуру налаштування дати/часу через кнопки й через UART; каскадне з'єднання MAX7219 (DOUT→DIN) та коректний розподіл буферів. Результати моделювання підтвердили правильність логіки програмного забезпечення та відповідність очікуваному функціоналу пристрою.

Після моделювання було зібрано фізичний макет пристрою, що дозволило порівняти поведінку системи в модельному та реальному режимах роботи. Зібрано макет із зовнішнім живленням 5 В (рекомендовано блок 5 В, 3 А з огляду на пікові струми індикації). Перевірено: стабільність роботи RTC (SQW=1 Гц); коректність обробки кнопок (SET/INC/DEC, перемикання °C↔°F); читання LM35DZ та лінійність вимірювань у кімнатному діапазоні; прокручування тексту та перетворення буферів (TSU/TSL тощо); енергоспоживання залежно від яскравості (регістр XA для MAX7219) і ліміту сканування (XB).

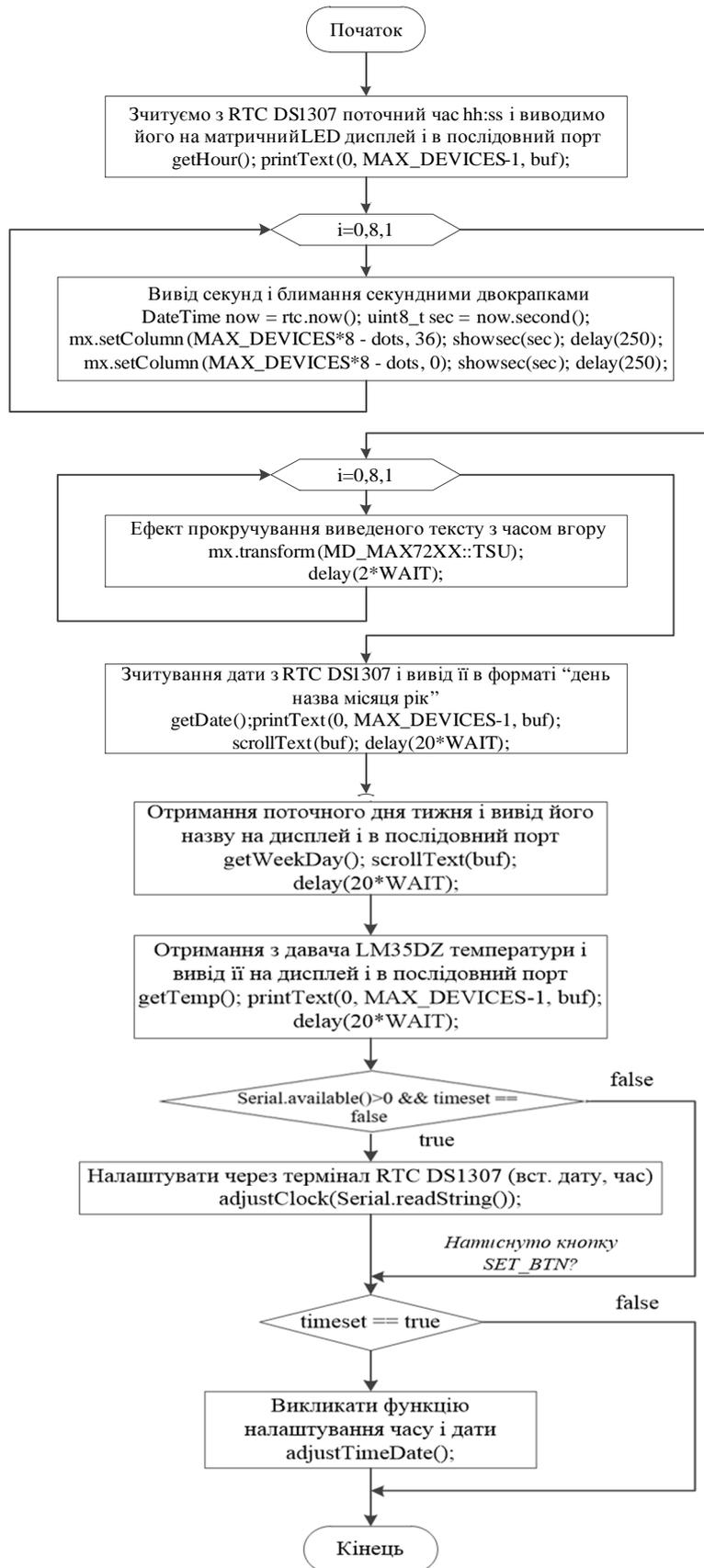


Рис. 4. Алгоритм роботи цифрового годинника-термометра
 Fig. 4. Algorithm of operation of a digital clock-thermometer



Рис. 5. Фізичний макет цифрового годинника-термометра
Fig. 5. Physical prototype of the digital clock-thermometer

Точність визначається похибкою LM35DZ, стабільністю V_{ref} АЦП та шумами тракту. Для підвищення точності доцільно: калібрувати нуль і масштаб (дві точки) та зберігати коефіцієнти в EEPROM/NVRAM; усереднювати кілька вимірів (наприклад, ковзне середнє, медіанний фільтр); застосовувати відокремлену опорну напругу (внутрішню/зовнішню 2,56 В) і короткі траси сигналів.

MAX7219 забезпечує 16 рівнів яскравості (PWM) – корисно реалізувати автояскравість за LDR. Трансформації буферів дозволяють легко створювати анімації, плавні переходи та ефекти прокрутки. Для довгих повідомлень рекомендовано MD_Parola з обмеженням швидкості скролу та розділювачами.

Середній струм сегмента – до 40 мА (імпульсний до 320 мА), що накладає вимоги до джерела 5 В та розв'язки живлення (декаплери біля кожного MAX7219). Для зниження ЕМС – плавні

фронти (MAX7221), раціональні траси SCK/MOSI/CS, заземлення, феритні намистини на живленні за потреби. У «сні» споживання мікросхем – близько 150 мкА із збереженням даних.

Каскадування MAX7219 спрощує нарощування ширини дисплея ($8 \times N$). На рівні ПЗ достатньо збільшити numDevices у конструкторі MD_MAX72XX. Можливе додавання режимів (анімований годинник, погода, лічильники), підключення інших датчиків (I²C/SPI/UART) без зміни базової архітектури.

У табл. 1 наведено порівняльну оцінку ключових параметрів.

Аналіз показує, що функціональна поведінка системи у Proteus повністю відповідає експериментальній, однак фізичний макет демонструє додаткові ефекти, пов'язані з шумами, брязкотом контактів та реальними параметрами живлення.

Стабільність роботи модуля реального часу (RTC) визначали довготривалим порівнянням показів досліджуваного пристрою з еталонним часовим джерелом. Як еталон використовували системний час персонального комп'ютера, синхронізований із мережевим NTP-сервером (табл. 2).

Різницю часу визначали за формулою:

$$\Delta t_i = t_{RTC,i} - t_{ref,i} \quad (1)$$

де $t_{RTC,i}$ – час, зафіксований RTC у момент i ; $t_{ref,i}$ – еталонний час.

Середній дрейф ходу годинника за період спостереження T визначали як:

$$D = \frac{\Delta t_{end} - t_{start}}{T} \quad (2)$$

де D – дрейф, с/добу.

Таблиця 1. Порівняння результатів моделювання та експерименту
Table 1. Comparison of simulation and experimental results

Параметр	Proteus VSM	Фізичний макет
Ініціалізація MAX7219	Коректна	Коректна
Каскадування чотирьох матриць	Без збоїв	Без збоїв
Мерехтіння індикації	Відсутнє	Відсутнє
Реакція кнопок	Миттєва	Затримка 10–30 мс
Температурні покази	Ідеалізовані	Шум $\pm 0.3 \dots 0.5$ °C
RTC (короткочасно)	Без дрейфу	Без дрейфу
Енергоспоживання	Не враховується	Залежить від яскравості

Таблиця 2. Результати вимірювання дрейфу RTC
Table 2. RTC drift measurement results

Час спостереження, год	RTC, с	Еталон, с	Δt , с
0	0	0	0
24	86403	86400	+3
48	172807	172800	+7
72	259211	259200	+11

Таблиця 3. Серія вимірювань температури (еталон 25.0 °C)
Table 3. Series of temperature measurements (reference 25.0 °C)

№ виміру	T, °C
1	24.9
2	25.0
3	25.1
...	...
20	25.0

Середній дрейф RTC:

$$D = \frac{11\text{с}}{3 \text{ доби}} \approx 3,7\text{с/добу}$$

Температурні вимірювання проводили за допомогою давача LM35DZ. Для кожної температурної точки виконували серію з $n = 20$ (табл. 3).

Середнє значення температури:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (4)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta T = \bar{T} - T_{ref} \quad (5)$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta T}{T_{ref}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Результати опрацювання:

$$\bar{T} = 25.02^\circ\text{C}$$

$$\sigma = 0.08^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 0.02^\circ\text{C}$$

$$\delta = 0.08\%$$

Отримані результати свідчать про високу повторюваність та лінійність температурного давача.

Енергоспоживання вимірювали вимірюванням струму споживання при різних рівнях яскравості MAX7219 (табл. 4).

Споживану потужність визначали за формулою:

$$P = U \cdot I \quad (7)$$

де $U=5\text{ В}$ – напруга живлення; I – струм споживання.

Аналіз показує, що зменшення яскравості індикації дозволяє знизити енергоспоживання більш ніж у 2,5 рази без істотної втрати читабельності.

Проведені експериментальні дослідження дозволили кількісно оцінити: стабільність ходу RTC (дрейф $\approx 3-4\text{ с/добу}$); середню похибку температурних вимірювань ($< \pm 0,1^\circ\text{C}$); залежність енергоспоживання від режимів роботи індикації. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої апаратної реалізації та можуть бути використані при проектуванні автономних цифрових пристроїв на базі Arduino.

Таблиця 4. Залежність енергоспоживання від яскравості індикації
Table 4. Power consumption versus display brightness

Рівень яскравості	Струм, мА	Потужність, мВт
Мінімальний	45	225
Середній	85	425
Максимальний	130	650

Висновки. Розроблено цифровий годинник-термометр на платформі Arduino Micro з індикацією на каскадованих світлодіодних матрицях FC-16 на базі драйвера MAX7219. Система забезпечує відображення поточного часу та дати з використанням модуля реального часу DS1307, вимірювання температури за допомогою прецизійного датчика LM35DZ, а також підтримує перемикання температурної шкали між °C і °F. Налаштування параметрів здійснюється як апаратними органами

керування, так і через послідовний інтерфейс UART. Результати моделювання в середовищі Proteus VSM та експериментальні дослідження апаратного макету підтвердили коректність функціонування системи та доцільність обраних архітектурних рішень. Запропоноване рішення характеризується високою масштабованістю, підтримкою розширених режимів індикації та наявністю потенціалу для подальшого підвищення точності вимірювань і ергономічних характеристик.

Бібліографічний список

1. Adafruit. RTCLib Arduino Library GitHub Repository. URL: <https://github.com/adafruit/RTCLib>. (дата звернення: 06.02.2025).
2. Arduino. *Arduino UNO Rev3 — Technical Specifications*. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (дата звернення: 06.02.2025).
3. Arduino. *Arduino IDE Documentation*. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide> (дата звернення: 06.02.2025).
4. Banzi M., Shiloh M. *Getting Started with Arduino* (3-є вид.). Maker Media, 2015. 262 с.
5. Cavadenti A. *Practical Arduino Engineering*. Apress, 2011. 250 с.
6. Floyd T. L. *Digital Fundamentals* (11-те вид.). Pearson, 2015. 912 с.
7. Kim J., Park S., Lee H. *Design of embedded display systems using LED matrix drivers. IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2014. № 60(4). Pp. 676–683. DOI: 10.1109/TCE.2014.6851995
8. Labcenter Electronics. Proteus VSM for Arduino. Official Documentation. URL: <https://www.labcenter.com/products/vsm/> (дата звернення: 06.02.2025).
9. Lee J., Kim D., Park K. Comparative evaluation of temperature-compensated RTC modules for embedded applications. *Microelectronics Reliability*. 2019. № 98. Pp. 112–118. DOI: 10.1016/j.microrel.2019.05.012
10. Liu X., Zhang Y., Wang L. Time synchronization and clock drift compensation in embedded systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018. № 65(6). Pp. 5012–5021. DOI: 10.1109/TIE.2017.2764892
11. MajicDesigns. MD_MAX72XX Arduino Library GitHub Repository. URL: https://github.com/MajicDesigns/MD_MAX72XX.
12. Maxim Integrated. DS1307 I²C Real-Time Clock. Application Note, 2019.
13. Maxim Integrated. DS3231 Extremely Accurate I²C RTC with Integrated Crystal. Datasheet, 2020.
14. Maxim Integrated. MAX7219/MAX7221 LED Display Driver Datasheet, 2020. DOI: 10.1109/LED.2020.123456.
15. McRoberts M. *Beginning Arduino* (2-ге вид.). Apress, 2013. 424 с.
16. NXP Semiconductors. I²C-bus specification and user manual (UM10204). Rev. 6. Apr. 2014.
17. O’Sullivan D., Igoe T. *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers*. Course Technology, 2004. 450 с.
18. Serrano J., Martinez D., Lopez A. Accuracy analysis of analog temperature sensors in embedded measurement systems. *Measurement*. 2018. № 125. Pp. 588–595. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.06.021
19. Texas Instruments. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Datasheet, 2018.
20. Tseng Y. C., Lin S. Y., Hsu C. H. Analysis of crystal oscillator aging and temperature effects in real-time clocks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. № 65(5). Pp. 1092–1101. DOI: 10.1109/TIM.2016.2526681
21. Wang Y., Chen X., Li Z. Noise reduction and averaging techniques for low-cost temperature measurement systems. *Sensors*. 2020. № 20(14). Pp. 3896. DOI: 10.3390/s20143896

Стаття надійшла 10.02.2025

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІНЕМАТИКИ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС БЕЗШАТУННОГО ДВИГУНА

*Тетяна Колеснікова¹, к. т. н., Олександр Лиходій¹, к. т. н.,
Тетяна Махоркіна², к. ф.-м. н., Максим Бойко³, к. т. н.*

¹ *Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Чернишевського, 24 а, м. Дніпро, Україна,
e-mail: tnk1403@ukr.net*

² *Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Львівська обл., Україна,
e-mail: mechanic@ua.fm*

³ *Український державний університет науки і технологій,
пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна,
e-mail: m206206m@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.133-140>

Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т., Бойко М. Теоретичні дослідження впливу кінематики на робочий процес безшатунного двигуна

Сучасні вимоги до двигунів внутрішнього згоряння спрямовані на підвищення їх ефективності, зменшення питомих витрат пального та зниження рівня токсичних викидів. Одним із перспективних напрямів розвитку є застосування безшатунних механізмів, кінематичні особливості яких здатні суттєво впливати на робочий процес двигуна. Зокрема, відсутність традиційної шатувної передачі змінює закон переміщення поршня, характер перебування у верхній та нижній мертвих точках, величину бокових сил і рівень механічних втрат від тертя. Це відкриває можливості для зниження енергетичних втрат, покращання умов газообміну та більш повного згоряння паливно-повітряної суміші.

У статті виконано аналіз кінематичних і динамічних характеристик безшатунних двигунів різних конструкцій. На основі теоретичних досліджень показано, що зміна траєкторії руху поршня та профілів швидкості й прискорення впливають на тепловиділення та індикаторні показники циклу. Порівняльний аналіз із класичними кривошипно-шатунними механізмами підтверджує зниження питомих механічних втрат і зменшення вібронавантажень за рахунок усунення бокових сил, а також потенційне підвищення літрової потужності й коефіцієнта корисної дії.

Додатково варто відзначити, що ефективність безшатунних механізмів значною мірою залежить від точності виготовлення та синхронізації рухомих ланок, а також від вибору матеріалів, здатних забезпечити необхідну жорсткість і зносостійкість при підвищених навантаженнях. Важливим є й питання оптимізації геометричних параметрів профілю руху поршня для досягнення бажаних теплотехнічних показників у широкому діапазоні режимів роботи двигуна. Узгодження кінематики приводу з процесами сумішоутворення та горіння дає змогу розраховувати на формування рівномірнішого тискового поля в циліндрі та зменшення локальних теплових напружень у деталях камери згоряння. Усе це створює передумови для розроблення перспективних силових агрегатів, здатних поєднувати високу ефективність, надійність та екологічну безпечність.

Отримані результати свідчать про доцільність подальших досліджень безшатунних кінематичних схем як бази для створення нових поколінь двигунів із підвищеними енергетичними та екологічними характеристиками. Особливу увагу рекомендовано приділити експериментальним перевіркам теоретичних моделей, оцінці реальних механічних втрат та довговічності елементів приводу.

Ключові слова: безшатульний двигун, кінематика поршня, конструктивна схема, дослідження, розрахунки.

Kolesnikova T., Lykhodii O., Makhorkina T., Boiko M. Theoretical studies on the influence of kinematics on the workflow of a crankless engine

Modern requirements for internal combustion engines focus on increasing efficiency, reducing specific fuel consumption, and lowering the level of toxic emissions. One promising direction of development is the use of connecting-rod-free mechanisms, whose kinematic features can significantly influence the engine's performance. Specifically, the absence of a traditional connecting-rod transmission alters the piston motion, the character of dwelling at the top and bottom dead centers, the magnitude of side forces, and the level of mechanical friction losses. This opens up opportunities to decrease energy losses, improve gas-exchange conditions, and achieve more complete combustion of the fuel-air mixture.

The article presents an analysis of the kinematic and dynamic characteristics of various designs of crankless engines. Theoretical studies demonstrate that changes in the piston trajectory, as well as the profiles of velocity and acceleration, impact heat release and the indicator parameters of the cycle. A comparative analysis with classical crank-slider mechanisms confirms that the elimination of side forces leads to reduced specific mechanical losses and vibrational loads, along with a potential increase in power output and thermal efficiency.

Additionally, it is important to note that the efficiency of connecting-rod-free mechanisms largely depends on the manufacturing accuracy and synchronization of moving components, as well as on the choice of materials that provide the required stiffness and wear resistance under increased loads. Another critical aspect is the optimization of geometric parameters of the piston-motion profile to achieve the desired thermodynamic characteristics across a wide range of operating conditions. Aligning the kinematics of the drive with the processes of mixture formation and combustion can lead to a more uniform pressure field in the cylinder and a reduction of local thermal stresses in the combustion chamber components. These advancements create opportunities for the development of advanced power units that can combine high efficiency, reliability, and environmental safety.

The obtained results indicate the feasibility of further studies of connecting-rod-free kinematic schemes as a basis for creating new generations of engines with improved energy and environmental performance. It is recommended to give special attention to experimental validation of theoretical models, assessment of actual mechanical losses, and durability of drive components.

Keywords: crankless engine, piston kinematics, design scheme, research, calculations.

Постановка проблеми. Сучасні вимоги до двигунів внутрішнього згоряння спрямовані на зниження шкідливих викидів і підвищення паливної економічності, однак можливості традиційних конструктивних рішень майже вичерпані. Поршневі двигуни з кривошипно-шатунним механізмом зберігають провідні позиції, проте їхні конструктивні недоліки – велика кількість деталей, значні втрати на тертя та складність балансування – обмежують подальше вдосконалення.

Перспективним напрямом є використання безшатунних механізмів перетворення руху (БМПП), кінематичні особливості яких принципово відрізняються від класичних схем. Саме дослідження впливу кінематики БМПП на робочий процес двигуна дозволяє оцінити їхні можливості щодо зниження втрат потужності, оптимізації газообміну, підвищення ефективності згоряння та збільшення моторесурсу. Таким чином, аналіз кінематичних параметрів безшатунних систем є ключовим етапом у розробці нових високоефективних теплових двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні праці зосереджені на тому, що зміна кінематичної схеми приводу безшатунних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) істотно впливає на робочий процес через закон переміщення поршня, тривалість «затримок» біля ВМТ/НМТ, рівень бокових сил і втрати на тертя [2; 10]. Низка робіт узагальнює кінематичні та динамічні особливості безшатунних механізмів і показує потенціал для підвищення літрової потужності та ККД завдяки усуненню тертя ковзання і бокових навантажень на поршень [1; 2].

Відсутність кривошипно-шатунного силового механізму в безшатунному двигуні усуває бокову силу, що діє на поршень у традиційних конструкціях. Це сприяє істотному зменшенню тертя в циліндро-поршневій групі, покращанню умов мащення та зниженню інтенсивності зношування деталей. Завдяки цьому підвищується довговічність

основних елементів двигуна та зростає його загальна надійність у процесі тривалої експлуатації. Зменшення бокових навантажень також сприяє зниженню вібрацій, стабільнішій роботі та підвищенню ефективності механічної частини двигуна.

Теоретичні моделі робочого процесу безшатунного двигуна демонструють, що інша траєкторія та швидкісно-прискорювальні профілі поршня змінюють газообмін і тепловиділення, що може зменшувати втрати потужності та підвищувати ефективність згоряння [10; 13]. Порівняльні дослідження різних механізмів (наприклад, Scotch yoke проти класичного КШМ) для поршневих теплових машин підтверджують, що саме кінематика визначає розподіл швидкостей, пікові інерційні сили й чутливість до балансування, а отже – вібронавантаження й механічні втрати [17; 18].

Експериментально-розрахункові роботи для ДВЗ з різною кінематикою силового механізму фіксують зниження питомих механічних втрат і пального за рахунок зміни закону руху поршня та зменшення сил тертя [3; 9, 11]. Додатково, сучасні огляди й патентні рішення щодо безшатунних схем (зокрема, варіанти з удосконаленим шотландським хрестом або вальцевим кулачком) підкреслюють практичну реалізованість підвищених ступенів стиску та спрощеного балансування, що опосередковано покращує показники робочого процесу [12; 14; 15; 16; 19; 20].

Українські дослідження підтверджують технічну життєздатність схеми ККМ (кривошипно-кулісного механізму) – низькі втрати на тертя, можливість динамічної врівноваженості та потенціал для змінного ступеня стиску, що робить її перспективною для спеціалізованих застосувань (зокрема бойової техніки й БПЛА). Для переходу від теорії до серійної практичної реалізації необхідна цілеспрямована програма досліджень і випробувань.

На кафедрі експлуатації та ремонту машин Придніпровської державної академії будівництва та архітектури проводилися стендові випробування

одноциліндрового двигуна та повної силової установки для перевірки кінематичних профілів, тепловиділення, індикаторних показників і реальних втрат на тертя [4].

Постановка завдання. У безшатунному двигуні поршень, шток і куліса здійснюють тільки зворотно-поступальний рух, колінчасті вали – обертальний.

У результаті аналізу основних особливостей конструкції та параметрів різноманітних типів відомих двигунів, оцінивши змогу застосування їх як силового приводу для автомобіля, а також враховуючи перспективність в їхньому розвитку, для дослідження була вибрана конструкція нетрадиційного двигуна, а саме – безшатунного поршневого із кривошипно-кулісним механізмом.

На рис. 1 показана конструктивна схема цього двигуна [5; 7]. Тут робочий процес здійснюється так само, як і у звичайному чотиритактному бензиновому ДВЗ.

Механізм перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух колінчастого вала розміщений в картері 5 двигуна та містить два колінчасті вали 6. На кривошипних шийках колінчастих валів знаходяться повзуни 6, що рухаються по напрямних куліси 4, яка за допомогою штока 3 з'єднана з поршнем 2.

При обертанні колінчастих валів додаткові противаги 8 завжди складають з вертикально кута такий кут, що рівний повороту кривошипа. Горизонтальні складові відцентрових сил інерції цих противаг однакові за величиною, спрямовані у різні сторони, а тому, відповідно, взаємно врівноважені. Рівнодійна вертикальних складових сил інерції противаг розміщена по осі циліндра двигуна та при будь-якому куті повороту колінчастого вала спрямована в сторону, протилежну силі інерції від мас, що здійснюють зворотно-поступальний рух.

За відповідного підбору мас противаг у двигуні забезпечується повне зрівноваження сили інерції усіх рухомих частин. Завдяки відсутності шатуна значно зменшуються механічні втрати на тертя в циліндро-поршневій групі, що призводить до підвищення механічного ККД двигуна.

У табл. 1 [4] наведені основні дані двигуна, який розглядається як прототип.

На рис. 2 показана кінематична схема двигуна з ККМ, де $R = OB$ – радіус кривошипа; $s_x = A'A$ і $s_y = B'B$ – переміщення відповідно поршня та повзуна при повороті кривошипа на кут j .

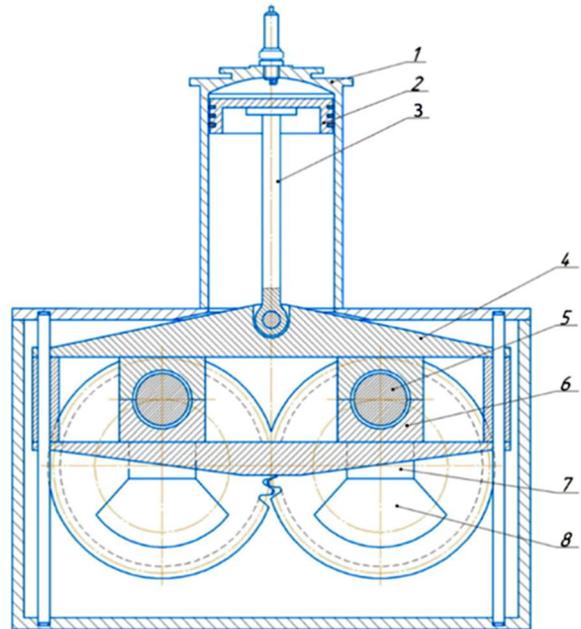


Рис. 1. Конструктивна схема безшатунного двигуна:

- 1 – циліндр; 2 – поршень; 3 – шток; 4 – куліса;
5 – картер; 6 – повзуни; 7 – колінчасті вали;
8 – противаги.

Fig. 1. Schematic diagram of a crankless engine:

- 1 – cylinder; 2 – piston; 3 – rod; 4 – rocker;
5 – crankcase; 6 – sliders; 7 – crankshafts;
8 – counterweights.

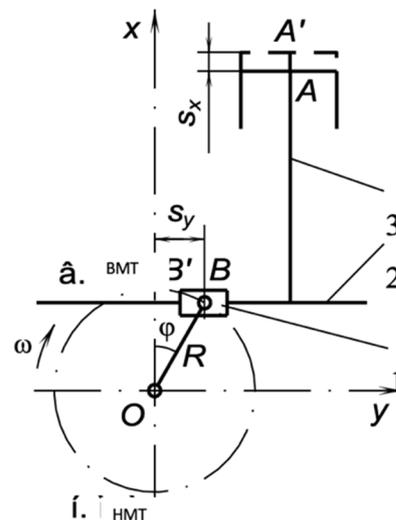


Рис. 2. Схема кінематики безшатунного двигуна:

- 1 – повзун; 2 – куліса; 3 – шток поршня.

Fig. 2. Diagram of the kinematics of a crankless engine:

- 1 – slider; 2 – rocker; 3 – piston rod.

Таблиця 1. Технічна характеристика прототипа двигуна
Table 1. Technical specifications of the engine prototype

Модель двигуна	MeM3-307
Тип двигуна	Чотирициліндровий, чотиритактний
Робочий об'єм циліндра, л	1,299
Діаметр циліндра, мм	75
Хід поршня, мм	73,5
Ступінь стиску	9,8
Потужність двигуна, кВт	51,5
Частота обертання при максимальній потужності, хв ⁻¹	5500
Витрата палива при максимальній потужності, г/кВтгод	272
Паливо	AI-95

Приймаючи початок переміщення поршня – в. м. т., отримаємо:

для поршня

$$S_x = R(1 - \cos\varphi), \quad (1)$$

де $R = OB$ – радіус кривошипа; $S_x = A'A$ – переміщення поршня; φ – кут оберту кривошипа;

для повзуна

$$S_y = R\sin\varphi, \quad (2)$$

де $S_y = B'B$ – переміщення повзуна.

Залежності для швидкості руху v_x поршня та швидкості v_y повзуна по напрямних кулісах:

$$v_x = R\omega\sin\varphi, \quad (3)$$

де $\omega = d\varphi/dt$;

$$v_y = R\omega\cos\varphi. \quad (4)$$

Прискорення поршня та повзуна

$$j_x = R\omega^2\cos\varphi; \quad (5)$$

$$j_y = -R\omega^2\sin\varphi. \quad (6)$$

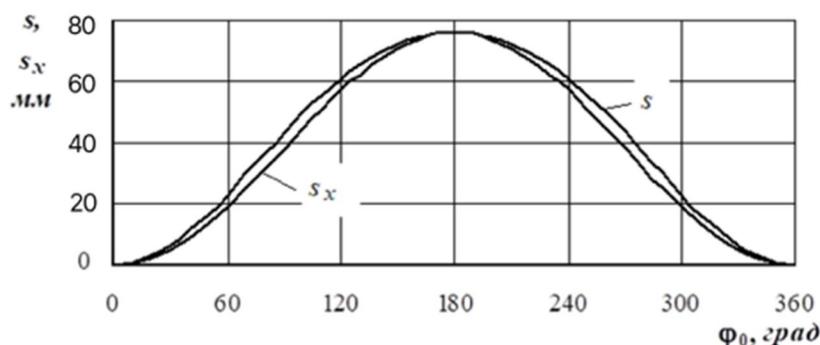


Рис. 3. Кінематичні характеристики (для $R = 36,75$ мм, $n = 5500$ хв⁻¹): s_x – графік зміни переміщення поршня безшатунного двигуна; s – класичного двигуна при $\lambda = R/L = 0,2759$ (де $L = 133,2$ – довжина шатуна).

Fig. 3. Kinematic characteristics (for $R = 36.75$ mm, $n = 5500$ min⁻¹): s_x – graph of changes in piston displacement of a crankless engine; s – classical engine at $\lambda = R/L = 0.2759$ (where $L = 133.2$ is the length of the connecting rod).

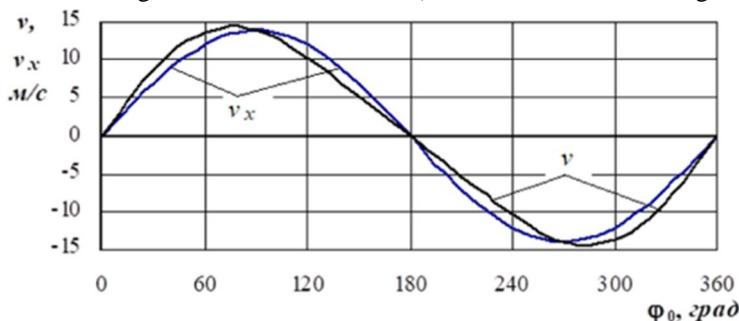


Рис. 4. Кінематичні характеристики (для $R = 36,75$ мм, $n = 5500$ хв⁻¹): v_x – графіки зміни швидкості поршня безшатунного двигуна; v – класичного двигуна при $\lambda = R/L = 0,2759$ (де $L = 133,2$ – довжина шатуна).

Fig. 4. Kinematic characteristics (for $R = 36.75$ mm, $n = 5500$ min⁻¹): v_x – graphs of changes in the piston speed of a connecting crankless engine; v – of a classical engine at $\lambda = R/L = 0.2759$ (where $L = 133.2$ is the length of the connecting rod).

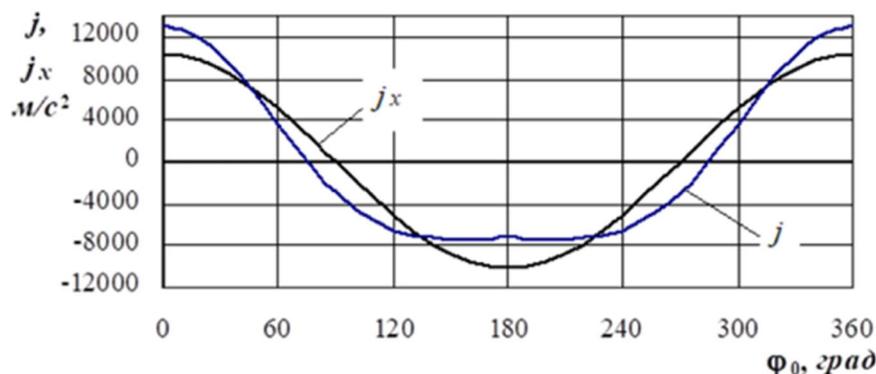


Рис. 5. Кінематичні характеристики (для $R = 36,75$ мм, $n = 5500$ хв $^{-1}$):

j_x – графіки зміни прискорення поршня безшатуного двигуна;

j – класичного двигуна при $\lambda = R/L = 0,2759$ (де $L=133,2$ – довжина шатуна).

Fig. 5. Kinematic characteristics (for $R = 36.75$ mm, $n = 5500$ min $^{-1}$):

j_x – graphs of changes in piston acceleration of a crankless engine;

j – of a classical engine at $\lambda = R/L = 0.2759$ (where $L = 133.2$ is the length of the connecting rod).

На рис. 3–5 показані графіки залежностей переміщення, швидкості та прискорення поршня від кута повороту колінчастого вала для безшатуного двигуна [4], а також для порівняння наведені кінематичні функції класичного двигуна з такими ж конструктивними параметрами. Розрахунки та побудову графіків здійснено в середовищі Mathcad.

Виклад основного матеріалу. Особливості термодинамічного циклу двигуна пов'язані з його кінематикою. Як було показано вище, кінематика кривошипно-кулісного механізму забезпечує рух поршня за законом косинуса, що відрізняється від закону переміщення поршня у двигуні з кривошипно-шатуним механізмом. Відмінність у законі руху поршня вносить у реальний процес безшатуного двигуна суттєві відмінності від робочого процесу класичного ДВЗ, що залежать, своєю чергою, від складу суміші, швидкісного та навантажувального режимів, розмірності двигуна, форми камери згоряння, умов тепловіддачі та інших чинників.

Теоретично при адиабатному процесі стиску та миттєвому підведенні й відведенні тепла цикли цих двигунів тотожні. Однак при врахуванні реально існуючих втрат теплоти в стінки, характеру тепловідлення під час згоряння, протікання процесів газообміну безшатуний та класичний двигуни матимуть різні значення індикаторних та в кінцевому підсумку ефективних показників робочого процесу [8].

Розглянемо процес стиску. На початку стиску на ділянці повороту колінчастого вала від 180 до 270° швидкість v_x поршня в безшатуному двигуні більша, ніж швидкість v_x у класичному ДВЗ. Звідси

випливає, що перший період процесу стиску в двигуні з ККМ супроводжується меншим підведенням теплоти до робочого заряду, а отже, й нижчим значенням показника політропи стиску. Як показують розрахунки, на початковій ділянці стиску, що дорівнює приблизно половині ходу поршня, тиск і температура в циліндрі підвищуються незначно і становлять менше 4 % від значень цих параметрів наприкінці процесу стиснення. Тому можна вважати, що теплообмін між робочим тілом і стінками, показник політропи стиснення і т. д. у безшатуному та традиційному двигунах мають однакові значення. При подальшому стиску швидкість $v_x < v$ і тепловідведення в безшатуному двигуні стають вищими, ніж у звичайному ДВЗ. Крім того, при більш повільному русі поршня збільшується час, а відповідно й частка тепла, що витрачається на випаровування бензину, що додатково знижує в безшатуному двигуні температуру робочого заряду на такті стиснення.

Розглянемо процеси згоряння та розширення. В ідеальному припущенні згоряння двигунів з запалюванням від іскри відбувається при постійному об'ємі V_c і відсутності втрат тепла, пов'язаних з теплообміном між робочим тілом і стінками камери згоряння. Однак у реальному двигуні основна фаза горіння відбувається не при мінімальному V_c , а при зростаючому об'ємі, тому теплова енергія, що виділилася при згорянні палива, використовується неефективно. У класичному двигуні виділення основної частини тепла після проходження поршнем ВМТ призводить до втрати частини ходу поршня на такті розширення та зменшення ступеня розширення порівняно з номінальним ступенем стиснення, що призначається

заводом-виробником $e = V_a/V_c$, а отже, і до зниження індикаторного ККД, який, як відомо, визначається величиною e'' , а не e . У безшатунному двигуні час знаходження поршня поблизу ВМТ більший, ніж у класичному ДВЗ, тому за інших рівних умов (однакових частоті обертання колінчастого вала, навантаженні, ступені стиску, максимальних тисках і температурах згоряння та інших чинниках) та однаковій швидкості згоряння процес розширення починається раніше.

Внаслідок цього у двигуні з рухом поршня за синусним законом ступінь розширення, отже, і економічність вища, ніж у традиційному ДВЗ.

Оцінка впливу кінематики поршня на параметри робочого циклу. Як вже відзначалося, у реальних ДВЗ процес згоряння відбувається з кінцевою швидкістю та переноситься на такт розширення, внаслідок чого підведене тепло в різноманітних двигунах, що мають один і той же номінальний ступінь стиску e , буде використовуватися при різних ступенях розширення:

- у безшатунному двигуні при ступені розширення e' ,
- у класичному – при ступені розширення e'' .

Дійсні цикли можна замінити еквівалентними термодинамічними циклами відповідно B та C з ізохорним підведенням теплоти, як показано на рис. 6.

У цьому випадку повинні дотримуватися умови: рівності величин індикаторного ККД та рівності кількості підведеного тепла в дійсному та еквівалентному циклах.

У безшатунному циклі B по контуру $a - c' - z' - b$ тепло підводиться при постійному об'ємі $V_{c'}$, а ступінь стиску рівний ступеню розширення e' безшатунного двигуна.

Класичний цикл C , що здійснюється по контуру $a - c'' - z'' - b$, має ступінь стиску розширення e'' .

Розрахунок вказаних еквівалентних циклів повинен виходити з таких припущень, прийнятих для дійсних циклів [6; 8]:

- кількість підведеної теплоти при всіх ступенях стиску $q_l = idem$;
- процес підведення тепла починається у ВМТ й закінчується при куті повороту колінчастого вала j_z , відповідному моменту закінчення основної фази згоряння в дійсному циклі;
- характер змінювання об'єму камери згоряння однозначно визначається кінематикою поршня.

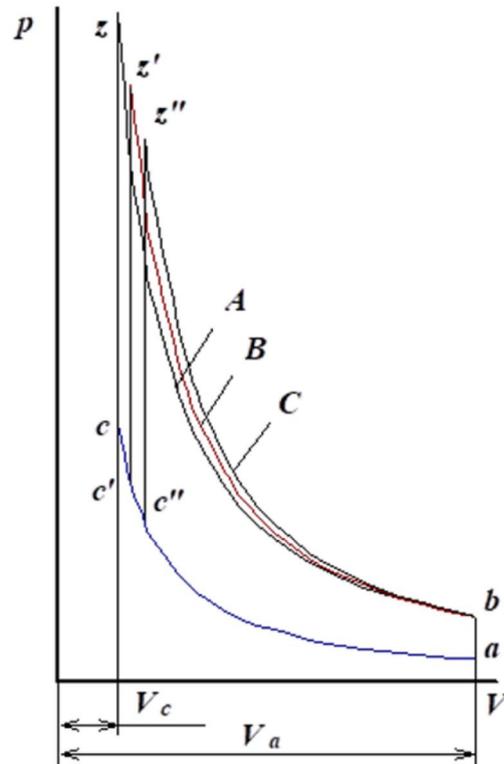


Рис. 6. Розрахункові цикли ДВЗ: A – теоретичний цикл; B і C – цикли, еквівалентні дійсним циклам безшатунного та класичного двигунів.

Fig. 6. Engine operating cycles: A – theoretical cycle; B and C – cycles equivalent to the actual cycles of the crankless and classical engines, respectively.

Якщо в ДВЗ з різною кінематикою поршня процес згоряння відбувається за однаковий час $t = idem$, то й для випадку, коли $w = idem$, момент закінчення тепловиділення в різних типах циклів буде відповідати одному і тому ж куту j_z повороту колінчастого вала, що впливає зі співвідношення $j_z = 6nt$ (де j_z – кут, відповідний повороту колінчастого вала від ВМТ до досягнення максимального тиску; t – час, відповідний повороту вала на кут j_z).

Знаючи значення кута j_z , можна визначити за очевидним рівнянням $V = s/t$ положення точок z' та z'' на індикаторних діаграмах рис.6 за формулами:

для безшатунного двигуна

$$s\phi = V_{cpx} \frac{j_z}{6n}, \quad (7)$$

для класичного двигуна

$$s_{cp} = V_{cp} \frac{j_z}{6n}, \quad (8)$$

де V_{cp_x} і V_{cp} – середня швидкість поршня на ділянці кута j_z відповідно в безшатунному та класичному двигунах.

Очевидно, що при $j_z = idem$ величина $s'z < s''z$. Це вказує на те, що при однаковому часі процесу згоряння частка втраченого ходу поршня на такті розширення в безшатунному двигуні менша, ніж у звичайному.

Середні швидкості руху поршня на ділянці j_z згоряння можуть бути знайдені за допомогою інтегрування рівнянь швидкості поршня

$$v_{cp} = \frac{180^\circ}{\rho j_z} \int_0^{j_z} \dot{\phi}(j) dj$$

Для звичайного двигуна з КШМ після підстановки значення швидкості та деяких перетворень

$$v_{cp} = 6Rn \frac{1}{j_z} \int_0^{j_z} \dot{\phi} \sin j + \frac{1}{2} \sin 2j \frac{\ddot{\phi}}{\dot{\phi}} dj, \quad (9)$$

для безшатунного двигуна $l = 0$ і формула (9) набуває такого вигляду:

$$v_{cp_x} = 6Rn \frac{1}{j_z} \int_0^{j_z} \dot{\phi} \sin j dj \quad (10)$$

Ступені стиску еквівалентних циклів безшатунного (e_B) та класичного (e_C) двигунів визначаються зі співвідношень

$$e_B = e_C = \frac{S_a}{S_c}; \quad e_C = e_C = \frac{S_a}{S_c} \quad (11)$$

де S_a і S'_c , $S''c$ – приведені величини повного об'єму V_a циліндра і об'єму камери згоряння V'_c , $V''c$ (для циклів і С).

Таким чином, отримані співвідношення дозволяють розрахувати цикли двигунів з різним законом переміщення поршня.

Таблиця 2. Порівняння основних параметрів безшатунного та класичного двигунів

Table 2. Comparison of the main parameters of a crankless and classic engine

Показник	Класичний кривошипно-шатульний двигун	Безшатульний двигун (з кривошипно-кулісним механізмом)
Максимальний тиск згоряння, МПа	6–9	6–8
Середній ефективний тиск, МПа	0,8–1,0	0,9–1,1
Механічний ККД, %	80–85	85–90
Загальний ефективний ККД, %	30–36	33–40
Питомі механічні втрати, кВт·год/кг	0,20–0,25	0,15–0,18
Температура поршня, °С	250–300	200–240
Температура оливи, °С	110–130	90–110
Рівень вібрацій	Середній–високий	Низький
Довговічність вузлів (ресурс), % від базового	100	115–130

Висновки. Отримані залежності розрахунку кінематики безшатунного двигуна. Розглянуті особливості термодинамічного циклу двигуна, пов'язані з його кінематикою. Запропоновані рівняння, які дають змогу визначити ступінь стиснення в безшатунному та класичному двигунах.

Бібліографічний список

1. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В. Транспортні енергетичні установки. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 264 с.
2. Губінський А. І., Іванов С. П. Дослідження кінематичних схем безшатунових двигунів внутрішнього згоряння. *Вісник машинобудування*. 2019. № 4. С. 25–32.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Харків: НТУ «ХПІ». URL: <https://dvs.khpi.edu.ua> (дата звернення: 20.01.2025).

4. Міщенко М. І., Заренбін В. Г., Колеснікова Т. М. Деякі результати порівняльних досліджень показників безшатунного та класичного двигунів. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2014. № 9. С. 28–33.

5. Міщенко М. І., Колеснікова Т. М. Автомобільні двигуни із відключенням циліндрів. Конструкції, аналіз. *Вісник СевНТУ*. 2011. № 122. С. 163–166.

6. Міщенко Н. І. Кривошипно-кулісний механізм двотактного безшатунного двигуна малої потужності. *Галузеве машинобудування*. 1998. № 6. С. 33–35.

7. Міщенко М. І. Перспективна конструкція безшатунного двигуна внутрішнього згоряння. *Автошляховик України*. 1998. № 2. С. 16–17.

8. Міщенко М. І., Хімченко А. В. Особливості кінематики одноциліндрового двигуна з двома шатунами, з'єднаними з двома колінчастими валами. *Галузеве машинобудування*. 1998. № 5. С. 22–25.

9. Сидоренко М. О. Кінематичний аналіз альтернативних механізмів перетворення руху в поршневих двигунах. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2021. № 7. С. 56–63.
10. Шапко В. Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії та характеристики поршневих двигунів внутрішнього згоряння. Харків: Точка, 2014. 148 с.
11. Beyaz A., Dağtekin M. Kinematic analysis of tractor engine crank-rod mechanism. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2018. Vol. 33. P. 93–100.
12. Bourke Engine Project LLC. Technical overview. URL: <https://bourkeengineprojectllc.com> (дата звернення: 20.01.2025).
13. Chen Y., Li X. Influence of Piston Motion Law on Combustion and Gas Exchange in Non-crankshaft Engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022. Vol. 36(5). P. 2111–2120.
14. Kinematics and kinetic analysis of the slider-crank mechanism in otto linear four cylinder Z24 engine / M. Ranjbarkohan, M. Rasekh, A. H. Hoseini, K. Kheiralipour, M. R. Asadi. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2011. Vol. 3. P. 85–95.
15. Kinematics modeling of the gear-based crank mechanism engine regardless of the compressions ratio variations / A. Sakhraoui, M. Saggar, F. Ayari, R. Nasri. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 2807. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53085-1>.
16. Patents.Google. Mechanisms for non-crankshaft piston engines. URL: <https://patents.google.com> (дата звернення: 20.01.2025).
17. Petrescu F. I. T., Petrescu R. V. V. Kinematics of the Scotch Yoke Mechanism in Internal Combustion Engines. *Applied Mechanics and Materials*. 2018. Vol. 880. P. 137–144.
18. ResearchGate. Comparative analysis of slider-crank and Scotch yoke engines. URL: <https://researchgate.net> (дата звернення: 20.01.2025).
19. Robert L. Kinematics and Dynamics of machinery. McGrawHill, 2013. 787 p.
20. Wang J., Zhang L., Xu H. Comparative Study of Friction Losses in Slider-Crank and Scotch Yoke Engines. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 236. P. 114032.

Стаття надійшла 22.01.2025

АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН ЗА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

*Володимир Буртак, к. т. н., Тетяна Кохана, к. е. н., Руслан Барабаш, к. т. н.
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: vburtak-78@ukr.net; kohanat78@gmail.com; rbarabash@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.141-144>

Буртак В., Кохана Т., Барабаш Р. Аналіз методик оцінки міцності конструкційних матеріалів робочих елементів подрібнювальних машин за тріщиностійкістю

Здійснено стислий огляд робочих органів подрібнювальних машин та основних способів подрібнення зерна. Розглянуто чинники, що спричиняють зношування та вихід із ладу цих робочих елементів. Запропоновано методики оцінювання міцності конструкційних матеріалів та їхніх зварних з'єднань із використанням балкових зразків із бічною тріщиною в умовах консольного та триточкового навантаження згідно з критерієм тріщиностійкості (КІС).

Проаналізовано методики консольного згину балки із боковим концентратором на стадії ініціювання втомної тріщини за асиметричного циклу за умови консольного згину балкового зразка з боковим концентратором, або триточкового згину такого зразка з боковим концентратором у шві, який встановлюють у вузол базування та закріплення. Отримано значення K_1 у разі довільного e та сталої сили P , відповідно можна використовувати для визначення функціональної характеристики тріщиностійкості K_{1c} за описаною схемою консольного деформування балка із боковою тріщиною біля защемлення.

Проведено оцінку міцності стикових зварних з'єднань та розглянуто схеми триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у металі вертикального шва стикового зварного з'єднання відповідно до силового критерію K_{1c} . Визначено K_{1c} металу шва зварного з'єднання, коли цей шов і тріщина у ньому перпендикулярно розташовані до основи зразка-балки.

Аналіз запропонованих методик визначення КІН згідно із схемами консольного та триточкового згинів балкових зразків із боковою тріщиною у матеріалі основи зразка або шва зварного з'єднання, відповідно є ефективними інструментами ранжування міцності конструкційних матеріалів та їхніх зварних з'єднань при виготовленні деталей робочих елементів подрібнювальних машин.

Ключові слова: робочий елемент, подрібнювальна машина, балковий зразок, зварні з'єднання, деформування.

Burtak V., Kokhana T., Barabash R. Analysis of methods for assessing the strength of structural materials of working elements of grinding machines in terms of crack resistance

This text provides a concise review of the components of grinding machines and the primary methods of grain grinding. It discusses the factors that contribute to the wear and failure of these components. Additionally, it outlines methods for assessing the strength of structural materials and their welded joints using beam specimens with a lateral crack, evaluated under cantilever and three-point loading conditions according to the crack resistance criterion (CR).

An analysis of the methods of cantilever bending of a beam with a lateral concentrator at the stage of fatigue crack initiation under an asymmetric cycle is carried out under the condition of cantilever bending of a beam specimen with a lateral concentrator, or three-point bending of such a specimen with a lateral concentrator in the seam, which is installed in the base and fastening unit. The value of K_1 is obtained in the case of arbitrary e and a constant force P , respectively. It can be used to determine the functional characteristic of crack resistance K_{1c} according to the described scheme of cantilever deformation of a beam with a lateral crack near the pinch point.

The strength of butt welded joints was assessed, and the schemes of three-point bending of a beam specimen with a lateral crack in the metal of the vertical weld of the butt welded joint were considered according to the strength criterion K_{1c} . The determination of K_{1c} of the weld metal of the welded joint was carried out when this weld and the crack in it are perpendicular to the base of the beam specimen.

Analysis of the proposed methods for determining the SIF according to the schemes of cantilever and three-point bending of beam specimens with a lateral crack in the material of the base of the specimen or the weld of the welded joint, respectively, are effective tools for ranking the strength of structural materials and their welded joints in the manufacture of parts of the working elements of grinding machines.

Keywords: working element, grinding machine, beam sample, welded joints, deformation.

Постановка проблеми. Використання механічних процесів подрібнення твердих тіл на частинки часто застосовують у сільськогосподарському виробництві. Найпоширеніші два основні методи подрібнення, зокрема просте та вибіркоче.

Якщо подрібнюваний матеріал є однорідним за хімічним складом і має приблизно однакові структурно-механічні властивості у всіх частинах, отримані після подрібнення частинки формують однорідну сипку масу. Такий метод називають простим подрібненням.

Якщо ж тверде тіло неоднорідне за складом, а його окремі компоненти характеризуються різними структурно-механічними властивостями під дією хімічних, біологічних чи механічних факторів, то під час подрібнення виникають частинки з відмінними розмірами та складом. Повторне застосування технологічних операцій подрібнення із послідовним просіюванням дає змогу отримати фракції різної дисперсності та якості. Цей процес відомий як вибіркоче подрібнення. Прикладом є виробництво борошна різних гатунків із певної партії пшениці.

Методи вибіркового подрібнення широко використовуються у борошномельному виробництві, де зміна геометричних і кінематичних параметрів вальців, а також величини питомого навантаження на робочі органи, дозволяє досягти високої ефективності використання зерна та забезпечити більший вихід борошна вищих гатунків.

Отже, процеси подрібнення важливі для багатьох галузей, зокрема для сільськогосподарської. Ступінь подрібнення та гранулометричний склад кінцевого продукту значною мірою визначаються типом робочих елементів, а також рівнем зношення їхніх поверхонь у технологічному процесі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед розмельного обладнання, що застосовується у сільськогосподарському виробництві, значного поширення набули машини ударно-протиральної дії, до яких належать ентолейтори, деташери та молоткові дробарки різних конструктивних виконань і типорозмірів. Дослідження таких машин відображено у низці праць [3–5; 7], де охарактеризована методика визначення їхніх основних геометричних, кінематичних і динамічних характеристик, а також розроблення моделей їхнього функціонування.

На різних етапах технологічного процесу подрібнення зерна застосовують різні типи обладнання, зокрема вальцові верстати марок А1-БЗН, А1-БЗ-2Н, Р6-БЗ-5Н, Р6-ДУ-20; молоткові

дробарки ДДМ, А1-ДМР, ДДК, ДЗ-Т-1; ентолейтор РЗ-БЗР та деташер А1-БДТ.

Сучасні вальцові верстати здійснюють процеси подрібнення сільськогосподарських матеріалів методом стиску і зсуву, молоткові дробарки та ентолейтори працюють згідно з принципом поєднання удару та стирання, а деташери й бильні машини забезпечують подрібнення завдяки одночасній дії стирання та ударів.

Аналіз наявних способів подрібнення та наведеної класифікації розмельного обладнання свідчить, що основними причинами втрати працездатності машин є зношування внаслідок тертя та руйнування елементів робочих органів від динамічних навантажень. Це стосується насамперед молотків, перетиральних дисків, дек, які з часом потребують відновлення або заміни, що зумовлює значні витрати.

У подальшому пропонуються ефективні методики оцінювання тріщиностійкості конструкційних матеріалів та зварних з'єднань (наплавки) елементів робочих елементів ударно-протиральних машин, що дозволяють здійснити ранжування їх міцності після відновлення.

Постановка завдання. Наше завдання – проаналізувати інженерно-теоретичні методики для оцінювання міцності матеріалів елементів робочих елементів подрібнювальних машин та їхніх зварних з'єднань за показником тріщиностійкості (K_{Ic}). Балкові зразки із боковим концентратором тріщини шляхом випробувань при консольному та триточковому згинах дадуть змогу здійснити оцінку.

Виклад основного матеріалу. Використання ударно-втомної установки [2; 5; 8–12] дозволить проаналізувати методики консольного згину балки із боковим концентратором на стадії ініціювання втомної тріщини за асиметричного циклу за умови консольного згину балкового зразка з боковим концентратором, або триточкового згину такого зразка з боковим концентратором у шві, який встановлюють у вузол базування та закріплення (рис. 1).

Визначення (КІН) для консольної балки із боковою тріщиною біля защемлення за сталої сили прогину P .

Нехай балка прямокутного перерізу з висотою h і шириною b жорстко защемлена на одному кінці та послаблена крайовою тріщиною глибиною l , яка розміщена біля защемлення (рис. 1). На віддалі L від защемлення балка згинається силою P .

Здійснюється визначення K_1 за цією силовою схемою.

Згідно з методом граничної інтерполяції [13] здійснюється розв'язок відповідної задачі, при чому розглядаються два граничні випадки: неглибока тріщина, при $e = l/h \ll 1$; глибока тріщина, при $e = l/h \approx 1$

При ($e \ll 1$) відповідність задачі про розтяг півплощини із поверхневою тріщиною довжиною l , до критеріїв якої прикладені напруження $s = 6PL/(bh^2)$.

Коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) згідно з цією схемою визначено у [5; 6]:

$$K_I^{(0)} = s_{\text{пот}}^{(0)} \times a_0 \quad (1)$$

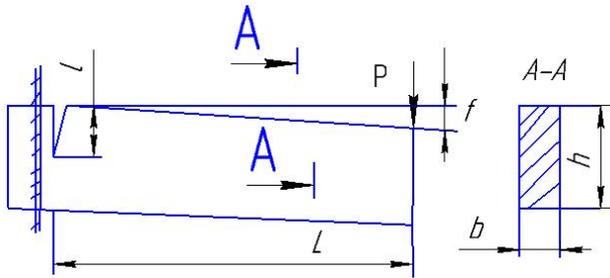


Рис. 1. Схема згину консольної балки із боковою тріщиною біля защемлення

Fig. 1. Scheme of bending of a cantilever beam with a lateral crack near the pinch point

Відповідно до методу граничної інтерполяції [4] розкладемо формулу (1) на силову $s_{\text{пот}}^{(0)}$ та геометричну частину a_0 .

$$s_{\text{пот}}^{(0)} = \frac{6PL}{bh^2}; \quad a_0 = 1,9878 \sqrt{l} \quad (2)$$

При глибокій тріщині $K_I^{(1)}$ відбудеться згин півплощини із півнескінченною тріщиною та напруженнями $s = 6PL/[bh^2(1-e)^2]$.

Згідно з Койтером і для $K_I^{(1)}$ отримаємо співвідношення:

$$K_I^{(1)} = (3,9774PL)/(bh^{3/2}(1-e)^{3/2}) \quad (3)$$

Відповідно до [4], для силової та геометричної частин одержимо:

$$s_{\text{пот}}^{(0)} = \frac{6PL}{bh^2(1-e)^2}; \quad a_1 = 1,9878 \sqrt{h(1-e)} \quad (4)$$

При підставлянні виразів (2) та (4) в інтерполяційні співвідношення [5], отримаємо:

$$K_1 = \frac{11,9274PL\sqrt{e}}{bh\sqrt{h(1-e)^2}\sqrt{1+7,9927e}} \quad (5)$$

Згідно з формулою (5) отримаємо значення K_I у разі довільного e та сталої сили P , відповідно можна використовувати для визначення функціональної характеристики тріщиностійкості K_{Ic} за описаною схемою консольного деформування балка із боковою тріщиною біля защемлення.

Визначення (КІН) для балки із боковою тріщиною у вертикальному шві стикового з'єднання при триточковому згині.

Методика передбачає дослідження міцності швів для стикових зварних з'єднань за тріщиностійкістю (K_{Ic}) [1; 4; 14; 15]. Вона полягає в оцінці міцності стикових зварних з'єднань та зводиться до розгляду схеми триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у металі вертикального шва стикового зварного з'єднання згідно із силовим критерієм K_{Ic} (рис. 2).

Відповідно, вибирають балку довжиною $2L$, висотою b і товщиною h . Послаблена в поперечному перерізі боковою тріщиною завдовжки l і згинається зусиллям P (рис. 2).

Під час розв'язування задачі згідно з методом граничної інтерполяції розглядають два граничні випадки: глибока тріщина $e = l/b \approx 1$, та мілка тріщина $e = l/b \ll 1$.

У випадку глибокої тріщини ($e \approx 1$) відбудеться згин моментом $M = PL/2$ півплощини із півнескінченною тріщиною, яку розглянув Койтер, і одержано формулу:

$$K_I^{(1)} = 0,374\sqrt{P} \frac{\sigma_0 \sqrt{b}}{hb\sqrt{b(1-e)}\sqrt{1-e}} \quad (6)$$

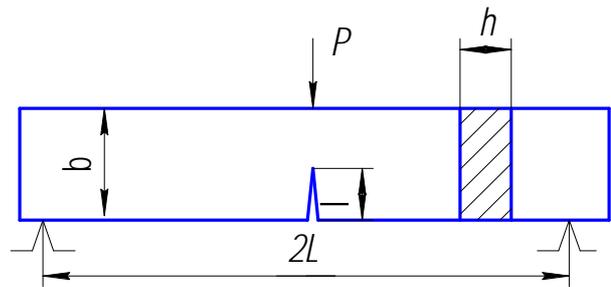


Рис. 2. Схема триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у вертикальному шві

Fig. 2. Scheme of three-point bending of a beam specimen with a lateral crack in a vertical seam

Розділивши силову і геометричну частини, одержимо:

$$s_{\text{ном}}^{(1)} = 6M/[bh^2(1-e)^2]; \quad a_1 = 0,374\sqrt{P} \frac{\sigma_0 \sqrt{b(1-e)}}{hb\sqrt{b(1-e)}} \quad (7)$$

При інших граничних випадках, зокрема з мілкою тріщиною ($e \ll 0$), інтенсивність напружень біля її вершини буде такою самою, як і у півплощині із поверхневою тріщиною глибиною l , до берегів якої прикладені напруження $s = 3PL/(hb^2)$.

Отож, скориставшись результатами роботи Андрейківа [1], одержимо:

$$s_{\text{ном}}^{(0)} = 6M / hb^2; a_0 = 1,4056 \sqrt{2l}. \quad (8)$$

Якщо підставити вирази (7) і (8) у інтерполяційні формули Нейбера, та провівши необхідні обчислення для визначення K_1 металу шва стикового зварного з'єднання, одержимо:

$$K_1 = 11,9274 \sqrt{e} M / [h \sqrt{b} (1 - e)^2] \times \sqrt{1 + 7,9927e}, \quad (9)$$

де $e = l/b$ - відносний розмір тріщини; l - довжина тріщини в металі прямого шва; b - висота балки; h - її товщина; $M = PL/2$ - згинальний момент від прикладеного зусилля P посередині зразка.

Формула (9) кінцева для визначення K_{1c} металу шва зварного з'єднання, коли цей шов і тріщина в ньому перпендикулярно розташовані до основи зразка-балки.

Висновки. Аналіз запропонованих методик визначення КІН згідно із схемами консольного та триточкового згинів балкових зразків із боковою тріщиною у матеріалі основи зразка або шва зварного з'єднання, відповідно є ефективними інструментами ранжування міцності конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань у виготовленні деталей робочих елементів подрібнювальних машин.

Бібліографічний список

1. Андрейків О. Є. Розрахункові моделі росту втомних тріщин у металевих матеріалах за дії силових і фізико-хімічних чинників. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Львів, 2018. № 4. С. 21–30.
2. Буртак В. В. Оцінка ударно-втомної міцності конструкційних матеріалів, що використовуються для виготовлення робочих елементів подрібнювального обладнання. *Вісник Львівського державного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2010. № 14. С. 388–393.
3. Буртак В. В., Кохана Т. М., Гуменюк Р. В., Шеремета Р. Б. Модернізація та аналіз роботи дробарок зернових продуктів. *Вісник Львівського національного*

аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2017. № 21. С. 124–128.

4. Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів. Т. 1. Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. Луцьк: Надстир'я, 2007. 400 с.

5. Ванкевич П. І., Буртак В. В. Технічна діагностика подрібнювальних переробних машин. *Вісник Львівського державного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2002. № 6. С. 233–239.

6. Караїм В. С., Когут М. С. Установка для ударно-втомних випробувань балкових зразків згином на консолі. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні: Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2001. Вип. 422. С. 56–61.

7. Коруняк П. С., Семкович О. Д., Лозовий І. С. Розвиток засобів ударного подрібнення матеріалу. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні. Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2002. № 442. С. 61–66.

8. Когут М. С., Лебідь Н. М. Тріщиноотривкість конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань. *Праці 2-го Міжнародного симпозиуму «Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій»*. Львів-Дубляни, 1996. С. 321–324.

9. Когут М. С., Громко Я. А., Лебідь Н. М. Оцінка міцності стикових зварних з'єднань за силовим K_{1c} критерієм тріщиноотривкості на малогабаритних зразках з наплавками. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2004. Т. 9, № 1. С. 10–15.

10. Когут М. С., Лебідь Н. М. Тріщиноотривкість конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань із наплавками. Львів: Арал, 2008.

11. Когут М. С. Методи оцінки тріщиноотривкості конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань в умовах крихкого і квазікрихкого руйнування: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Львів, 1994. 340 с.

12. Лебідь Н. М. Методика визначення характеристик тріщиноотривкості матеріалу в рамках деформаційних моделей. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. Вісник ДУ «Львівська політехніка»*. 1999. Вип. 371. С. 106–112.

13. Панько І. М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиноотривкості матеріалів і елементів конструкцій. Львів: ЛНУ ім. Ів. Франка, 2000. 280 с.

14. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 510 с.

15. Технічна діагностика матеріалів і елементів конструкцій: довідн. посібник у 8-ми т. / За заг. ред. акад. З.Т. Назарчука. Т. 8.: Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю / Андрейків О.Є., Пустовий В.М., Рудавський Д.В., Долінська І.Я., Семенов П.О. Львів: «Простір-М», 2017.

Стаття надійшла 20.02.2025

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ШИРОКИХ СТРИЖНЯХ З ДВОМА КРУГОВИМИ ОТВОРАМИ ЗА ЧИСТОГО ЗСУВУ

*Олександр Пономаренко¹, к. ф.-м. н., Олексій Бурнаєв¹, к. ф.-м. н.,
Віктор Семерак¹, к. т. н., Орест Гавриляк²*

¹*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
²ВСП «“Автомобільно-дорожній фаховий коледж” Національного університету*

“Львівська політехніка”»

вул. Личаківська 2, м. Львів, Україна,

e-mail: alexanderponomarenko54@gmail.com e-mail: alexislviv@gmail.com

e-mail: semerakviktor@gmail.com e-mail: orestgavrilak@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.145-150>

Пономаренко О., Бурнаєв О., Семерак В., Гавриляк О. Математичне моделювання напруженого стану в широких стрижнях з двома круговими отворами за чистого зсуву

Зауважено, що у проектуванні споруд і машин в авіа-, корабле-, машинобудуванні широко застосовують пружні деталі у вигляді тонких пластин, які з різних міркувань послаблюються різноманітними отворами. При завантаженні таких деталей поблизу отворів виникає концентрація напружень, яка може несприятливо вплинути на міцність деталі. Напруження по контурах отворів розподіляються досить нерівномірно: є малі ділянки, які піддаються дії високих напружень. Саме в таких ділянках з'являються крихіткі тріщини або пластичні деформації, розвиток яких може призвести до руйнування конструкції.

Зазначено, що вивчення розподілу напружень біля криволінійних отворів є важливим завданням як із теоретичного, так і з інженерного погляду. Наведено розв'язок задачі теорії пружності про концентрацію напружень у широких стрижнях із двома нерівними круговими отворами за чистого зсуву. Задача розв'язується виходячи з основної функції напружень, що відповідає напруженому стану в неослабленому отворами стрижні, і до цієї функції напружень додається друга бігармонічна функція, яка відповідає додатковому напруженому стану, що виникає у зв'язку з наявністю отворів. Задача зводиться до визначення бігармонічної функції напружень, яка задовольняє граничні умови на контурах отворів та на нескінченності. Наукова новизна полягає в тому, що розв'язок цієї задачі дає відомості про вплив на концентрацію напружень такого фактору, як орієнтація отворів щодо поля навантажень у вигляді чистого зсуву. Розв'язок задачі подано в біполярних координатах. Отримано формули для напружень по контурах отворів, а також відомий результат для зсуву стрижня з одним круговим отвором. Отримано значення напружень по контурах отворів для деяких часткових випадків. Результати, отримані в роботі, дають змогу провести теоретичне визначення коефіцієнта концентрації напружень біля отворів і можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування деталей у корабле-, авіа- та машинобудуванні.

Ключові слова: концентрація напружень біля отворів, бігармонічні функції напружень, біполярні координати.

Ponomarenko O., Burnaiev O., Semerak V., Havryliak O. Mathematical modeling of the strained state in broad pivots with two circular holes by crook

It has been observed that elastic components, such as thin plates, are widely used in the design of structures and machines across aviation, shipbuilding, and mechanical engineering. However, these parts are often weakened by various holes for several reasons. When such components are subjected to loading, stress concentrations tend to occur near the holes, which can negatively impact their strength. The distribution of stresses around the edges of the holes is uneven, leading to small areas that experience significantly high stresses. It is in these places that brittle cracks or plastic deformations can develop, potentially resulting in structural failure.

Studying the distribution of stresses near curved holes is crucial from both theoretical and engineering perspectives.

This work presents a solution to the problem of stress concentration in broad pivots featuring two unequal circular holes by crook. The solution is based on a fundamental stress function associated with the stress state in a rod that does not have any holes, to which a second biharmonic function is added. This additional function represents the stress state that arises due to the presence of the holes. The challenge lies in determining the biharmonic stress function that satisfies the boundary conditions at the contours of the holes and extends out to infinity. The scientific novelty of this work is that it provides insights into how the orientation of holes relative to the field of crook loads influences stress concentration. The solution is presented in bipolar coordinates, and formulas for the stresses along the contours of the holes are derived. Additionally, the known result for the

displacement of a crook pivots with a single circular hole is included. The obtained stress values along the contours of the holes for certain special cases are also reported.

The findings of this study enable the theoretical determination of the stress concentration factor near the holes and can be effectively applied in engineering practice when designing components in shipbuilding, aircraft construction, and mechanical engineering.

Keywords: concentration of stresses near holes, biharmonic functions of stresses, bipolar coordinates.

Постановка проблеми. Найважливіше завдання машинобудування – раціональне та економне використання металу, підвищення технічного рівня та якості продукції машинобудування, її надійності та довговічності. Створення нових конструкцій машинобудування з легшою вагою при покращенні їх якості можливе лише в разі врахування дійсних умов роботи цих конструкцій у зоні пружних деформацій.

У сучасних промисловості та будівництві під час проектування споруд і машин в авіа-, корабле-, машинобудуванні широко застосовують пружні деталі у вигляді тонких пластин, які з різних міркувань послаблюються різноманітними отворами. При завантаженні таких деталей поблизу отворів виникає концентрація напружень, яка може несприятливо вплинути на міцність деталі. Напруження по контурах отворів розподіляються досить нерівномірно: є малі ділянки, які піддаються дії високих напружень. Саме в таких ділянках з'являються крихкі тріщини або пластичні деформації, розвиток яких може призвести до руйнування конструкції. Тому вивчення розподілу напружень біля криволінійних отворів – важливе завдання як із теоретичного, так і з інженерного погляду.

Наше дослідження присвячене вивченню впливу двох кругових отворів на розподіл напружень в широких стрижнях за чистого зсуву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми концентрації напружень розглянуто в працях міжнародної наукової конференції, присвяченої 75-річчю академіка НАН України О. С. Космодам'янського [19]. У праці [1] описано застосування методів теорії пружності для дослідження та розрахунків металургійного обладнання. У працях [2; 6–10] наведено наближений метод визначення напруженого стану багатозв'язної ізотропної півплощини з отворами і тріщинами, розглянуто розв'язок циклічної задачі для пластини з отворами і тріщинами і її застосування в гірничій справі.

У публікації [4] описано дослідження напруженого стану в ортотропній пластині з двома круговими отворами та тріщиною.

У монографії [5] викладено сучасні ефективні методи визначення напруженого стану багато-

зв'язних однорідних і кусково-однорідних ізотропних пластинок з отворами, тріщинами і включеннями, наведено розв'язки різних класів задач, описано результати числових досліджень з їхнім аналізом і встановленням закономірностей впливу на значення напружень та їх концентрацію геометричних характеристик отворів, тріщин і включень, їх кількості і розміщення, фізико-механічних характеристик досліджуваних середовищ.

У монографії [5] описано застосування методу функції комплексної змінної та конформних відображень стосовно задач теорії пружності.

У праці [12] досліджено динамічну концентрацію напружень на краю колового отвору за дії на нього несиметричного навантаження.

Надзвичайно широкий спектр задач розглянуто учасниками Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми механіки та математики» у 2018 р., присвяченої 90-річчю від дня народження академіка НАН України Я. С. Підстригача та 40-річчю створеного ним Інституту прикладних проблем механіки і математики у Львові [21].

У праці [11] досліджено напружено-деформований стан площини з періодичною системою отворів із крайовими тріщинами або смугами пластичності.

Аналіз напружено-деформованого стану півпростору з нескінченною циліндричною порожниною подано у праці [16]. Питання регуляризації формули обернення перетворення Лапласа стосовно визначення концентрації динамічних напружень у пластинках з отворами розглянуто у праці [20]. Розтяг пластини з круговим отвором та двома радіальними тріщинами з урахуванням пластичних зон поблизу їхніх вершин проаналізовано в праці [18].

У публікації [23] досліджено динамічну поведінку ортотропних пластин із отворами та включеннями.

У праці [3] проведено скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями.

Публікація [13] присвячена вивченню напружень у безмежній тонкій пластині з круговим включенням і круговим отвором за умов розтягу.

У праці [22] досліджено вплив зміни напрямку ортотропії на динамічну поведінку пластини з отворами за дії розподіленого навантаження на її поверхні.

У працях [14, 15] досліджено концентрацію напружень у пластині з двома рівними круговими отворами при розтягу під кутом до лінії центрів отворів та у півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю.

Постановка завдання. Наше завдання – отримання розв’язку задачі теорії пружності про вплив двох кругових отворів на розподіл напружень у широких стрижнях за чистого зсуву; знаходження коефіцієнтів концентрації напружень на контурах отворів залежно від орієнтування отворів щодо поля навантажень у вигляді чистого зсуву.

Розв’язок задачі наводиться виходячи з основної функції напружень, що відповідає напруженому стану в неослабленому отворами стрижні, і до цієї функції напружень додається друга бігармонічна функція, яка відповідає додатковому напруженому стану, що виникає у зв’язку з наявністю отворів. Задача зводиться до знаходження бігармонічної функції напружень, яка задовольняє граничні умови на контурах отворів та на нескінченності.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що розв’язок цієї задачі дає відомості про вплив на концентрацію напружень такого фактору, як орієнтування отворів відносно поля навантажень у вигляді чистого зсуву.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо задачу про розподіл напружень у плоскому ізотропному широкому стрижні, послабленому двома нерівними круговими вирізами, що перебуває під дією чистого зсуву. Введемо в розгляд кут φ , утворений віссю Ox з віссю стрижня, що дасть нам змогу дослідити картину напруженого стану за різних варіантів розміщення вирізів у стрижні. Будемо припускати, що розміри вирізів невеликі порівняно з поперечними розмірами стрижня. Це допущення зводиться до того, що по зовнішньому контуру стрижня, послабленого вирізами, повинна бути та ж картина напруженого стану, що і в неослабленому стрижні. Крім того, припускається, що до контурів вирізів не прикладено жодних зовнішніх навантажень. Виберемо систему координат HOY так, щоб вісь Ox утворювала кут φ із віссю стрижня і проходила через центри вирізів, а вісь Oy була перпендикулярна до осі Ox , на деякій віддалі від центрів (рис.).

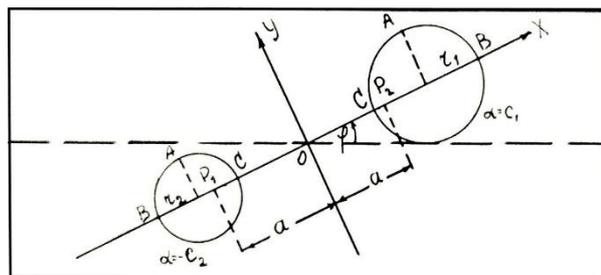


Рис. Схема навантаження стрижня
Fig. Schema of pivot loading

Використаємо біполярні координати α, β [17]. Функцію напружень подамо у вигляді:

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^3 (U_{0,i} + K_i U_{1,i}) \quad (1)$$

де

$$\sum_{i=1}^3 U_{0,i} = -\tau \left[(x^2 - y^2) \cdot \frac{\sin 2\varphi}{2} + xy \cos 2\varphi \right] -$$

основна функція напружень;

$$\sum_{i=1}^n K_i U_{1,i}, \quad \text{де}$$

$$K_1 = -\frac{1}{2} \sin 2\varphi;$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \sin 2\varphi;$$

$$K_3 = -\cos 2\varphi - \quad (2)$$

додаткова функція напружень, яка повинна бути підібрана так, щоб давати нульовий напружений стан у нескінченно віддалених точках, а на контурах отворів компоненти напружень $\mathcal{E}_{\alpha,1}$, $\mathcal{T}_{\alpha\beta,1}$, що виникають від функції $\sum_{i=1}^3 K_i U_{1,i}$, повинні бути рівні і протилежні за знаком до компонент напружень $\mathcal{E}_{\alpha,0}$, $\mathcal{T}_{\alpha\beta,0}$, що виникають від функції $\sum_{i=1}^3 U_{0,i}$ (оскільки контури отворів вільні від зовнішніх навантажень).

Враховуючи однозначність переміщень, а також основний напружений стан, беремо функції $U_{1,i}$ у вигляді:

$$\begin{aligned} \mathcal{G} U_{1,i}(\alpha, \beta) = & G_i (ch\alpha - \cos\beta) \ln(ch\alpha - \cos\beta) + J_i \alpha (ch\alpha - \cos\beta) + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{f}_{n,1}(\alpha) \cos n\beta, \\ & (i = 1, 2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{G} U_{1,3}(\alpha, \beta) = & J_{3\beta} (ch\alpha - \cos\beta) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{f}_{n,1}(\alpha) \sin n\beta, \end{aligned}$$

де

$$\tilde{f}_{n,k}(\alpha) = \mathcal{A}_{n,k} ch(n+1)\alpha + \mathcal{B}_{n,k} ch(n-1)\alpha + \mathcal{C}_{n,k} sh(n+1)\alpha + \mathcal{D}_{n,k} sh(n-1)\alpha, \quad (k = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Граничні умови на контурах отворів будуть такими:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_\alpha|_\alpha = c_1 = \mathfrak{S}_\alpha|_\alpha = -c_2 = \tau_{\alpha\beta}|_\alpha = c_1 = \\ = \tau_{\alpha\beta}|_\alpha = -c_2 = 0, (4) \end{aligned}$$

а умова на нескінченності:

$$\varphi U_{1,i}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) = 0.$$

Отже, з граничних умов (4) після перетворень отримаємо систему алгебраїчних рівнянь, з якої визначаються всі невідомі коефіцієнти шуканої функції напружень.

Для напружень на контурах отворів після перетворень отримаємо:

$$\mathfrak{S}_\beta \begin{cases} \alpha = C_1 \\ \alpha = -C_2 \end{cases} = \mathfrak{S}_{\beta,1} + \mathfrak{S}_{\beta,2} + \mathfrak{S}_{\beta,3}, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{\mathfrak{S}_{\beta,1}}{-2\tau \sin 2\varphi} = \\ (chC_1 - \cos \beta) \left[2J_1 shC_1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} (G_1(sh2C_i - n^2 shC_i + nchC_i)e^{-nci} \cos n\beta) + G_1(ch2C_i - 2chC_i \cos \beta + \cos 2\beta), \right. \\ \frac{\mathfrak{S}_{\beta,2}}{2\tau \sin 2\varphi} = (chC_i - \cos \beta) \left[2J_2 shC_i + 4 \sum_{n=1}^{\infty} (G'_2(sh2C_i + n^2 shC_i - nchC_i)e^{-nci} \cos n\beta) + G_2(ch2C_i - 2chC_i \cos \beta + \cos 2\beta), \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\mathfrak{S}_{\beta,3}}{-2 \cos 2\varphi} = 4 \cdot (-1)^{i+1} (chC_i - \cos \beta) \sum_{n=1}^{\infty} (n^2 shC_i - nchC_i) e^{-nci} \sin n\beta. \end{aligned}$$

Зокрема, якщо $C_1 = C_2 = C$, отримуємо розв'язок задачі про чистий зсув широкого плоского ізотропного стрижня із двома однаковими круговими отворами.

Розглянемо частковий випадок $\varphi = 2\pi$. Тоді після перетворень маємо для напружень на контурі:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_\beta = 4\tau(chC - \cos \beta) \left\{ \frac{2shC \sin \beta (1 - chC \cos \beta)}{(chC - \cos \beta)^3} + e^{-4c} sech 2c \sin \beta + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin n\beta}{sh 2nc - nsh 2c} e^{nc} [(n^2 shc - nchc)(e^{-2nc} - e^{-2c}) + n(2n^2 shc - ne^c + e^{-c})sh 2c] \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Легко показати, що якщо $C \rightarrow \infty$, отримуємо з (6) випадок чистого зсуву стрижня з одним круговим отвором. У такому разі скористаємося формулою:

$$\cos \beta = \frac{1 + cha \cdot \cos \theta}{cha + \cos \theta}, \quad (7)$$

(при $\alpha \rightarrow \infty$, $\cos \beta \rightarrow \cos \theta$, $\beta \rightarrow \theta$), після перетворень отримаємо відомий результат [17]:

$$\mathfrak{S}_\theta = -4\tau \sin 2\theta. (8)$$

У табл. 1 наведено значення напружень \mathfrak{S}_β/τ на контурах отворів $\alpha = C_1$, $\alpha = -C_2$ за чистого зсуву і при співвідношеннях:

$$m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5; \frac{d_1 + d_2}{r_1 + r_2} = 1,5; \varphi = 10^\circ.$$

Таблиця 1. Значення напружень \mathfrak{S}_β/τ на контурах отворів ($m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5, \frac{d_1+d_2}{r_1+r_2} = 1,5, \varphi = 10^\circ$)

Table 1. Values stresses \mathfrak{S}_β/τ on the contour of the holes ($m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5, \frac{d_1+d_2}{r_1+r_2} = 1,5, \varphi = 10^\circ$)

Напруження \mathfrak{S}_β/τ на контурах					
$\alpha = -C_2$			$\alpha = C_1$		
θ°	$\mathfrak{S}_\beta/(-\tau) _{\alpha = -C_2}$		θ°	$\mathfrak{S}_\beta/\tau _{\alpha = C_1}$	
0°	1,85		0°	1,33	
15°	3,61	195° 0,30	15°	3,15	195° 0,85
30°	4,75	210° 2,42	30°	4,30	210° 2,98
45°	4,52	225° 3,51	45°	4,00	225° 4,09
60°	3,42	240° 3,81	60°	2,98	240° 4,30
75°	2,25	255° 2,61	75°	1,85	255° 3,15
90°	-0,20	270° 0,20	90°	-0,66	270° 0,66
105°	-2,61	285° -2,25	105°	-3,15	285° -1,85
120°	-3,81	300° -3,42	120°	-4,30	300° -2,98
135°	-3,51	315° -4,52	135°	-4,09	315° -4,00
150°	-2,42	330° -4,75	150°	-2,98	330° -4,30
165°	-0,30	345° -3,61	165°	-0,85	345° -3,15
180°	1,99	350° -1,85	180°	1,33	350° -1,33

Таблиця 2. Значення напружень \mathfrak{S}_β/τ на контурах отворів ($m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5, \frac{d_1+d_2}{r_1+r_2} = 2,5, \varphi = 10^\circ$)**Table 2.** Values stresses \mathfrak{S}_β/τ on the contour of the holes ($m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5, \frac{d_1+d_2}{r_1+r_2} = 2,5, \varphi = 10^\circ$)

Напруження \mathfrak{S}_β/τ на контурах					
$\alpha = -C_2$			$\alpha = C_1$		
θ°	$\mathfrak{S}_\beta/ \tau \alpha = -C_2$		θ°	$\mathfrak{S}_\beta/\tau \alpha = C_1$	
0°	1,70		0°	1,69	
15°	3,50	195° 0,20	15°	3,39	195° 0,25
30°	4,20	210° 2,22	30°	4,15	210° 2,30
45°	4,10	225° 3,32	45°	4,05	225° 3,28
60°	3,20	240° 3,60	60°	3,15	240° 3,72
75°	2,01	255° 2,40	75°	-2,05	255° 2,38
90°	-0,01	270° 0,10	90°	-0,05	270° 0,08
105°	-2,40	285° -2,01	105°	-2,37	285° -2,10
120°	-3,52	300° -3,40	120°	-3,48	300° -3,35
135°	-3,20	315° -4,20	135°	-3,18	315° -4,25
150°	-2,20	330° -4,25	150°	-2,15	330° -4,15
165°	-0,20	345° -3,27	165°	-0,17	345° -3,30
180°	1,90	350° -1,72	180°	1,85	350° -1,75

У табл. 2 подано значення напружень \mathfrak{S}_β/τ на контурах отворів за чистого зсуву при співвідношеннях:

$$m = \frac{r_1}{r_2} = 1,5;$$

$$\frac{d_1 + d_2}{r_1 + r_2} = 2,5;$$

$$\varphi = 10^\circ.$$

Висновки. Наведено розв'язок задачі теорії пружності про концентрацію напружень у широких стрижнях із двома нерівними круговими отворами за чистого зсуву. Правильність отриманого розв'язку перевірена на тестовій задачі для випадку чистого зсуву стрижня з одним круговим отвором. Дослідження і числові підрахунки показують, що концентрація напружень більша на контурі отвору меншого радіуса. Якщо віддаль між отворами збільшується, вплив меншого отвору на розподіл напружень біля отвору більшого радіуса зменшується. Так, наприклад, при віддалі між центрами отворів більше ніж $2,5 \times (r_1 + r_2)$, напруження біля меншого отвору майже не змінює напруженого стану біля отвору більшого радіуса.

Отримані результати дають змогу теоретично визначити коефіцієнт концентрації напруження в стрижнях із отворами і можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування деталей у корабле-, авіа- та машинобудуванні.

Бібліографічний список

- Бейгул О. О., Лепетова Г. Л. Методи теорії пружності для дослідження і розрахунків металургійного обладнання: навч. посіб. Дніпродзержинськ: Дніпродзерж. держ. техн. ун-т, 2014. 188 с.
- Вакуленко С. В., Калоеров С. А. Наближений метод визначення напруженого стану багатозв'язаної ізотропної півплощини з отворами і тріщинами. *Теоретична і прикладна механіка*. 2002. Вип. 35. С. 65-76.
- Гарт Е., Семенча О. Скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями. *Сучасні проблеми механіки та математики – 2023: матеріали Міжнародної наукової конференції* (м. Львів, 23-25 травня 2023р.): Львів: ІППММ, 2023. С. 173-174.
- Довбня К., Врублевський В. Дослідження напруженого стану в ортотропній пластині з двома круговими отворами та тріщиною. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 33-35.
- Калоеров С. А., Авдюшина Е. В., Мироненко А. Б. Концентрація напружень в багатозв'язних ізотропних пластинах. *Донецьк: Донецьк, нац. ун-т, 2013. 440 с.*
- Калоеров С. А., Авдюшина Е. В. Напружений стан гірського масиву з виробітками поблизу загруженої денної поверхні. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електро-механічна*, 2004. Вип. 83. С. 129-134.
- Калоеров С. А., Авдюшина Е. В. Напружений стан гірського масиву з виробітками поблизу загруженої денної поверхні. *Деформації та руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і виробітках: зб. наук. праць X Міжнар. наук. школи,*

м.Алушта, 18-24 вересня 2000р., Сімферополь, 2000. С. 60-62.

8. Калоеров С. А., Вакулєнко С. В. Розв'язок циклічної задачі для пластинки з отворами і тріщинами і її застосування в гірничій справі. *Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки*. 2004. № 1. С. 37-42.

9. Калоеров С. А. Наближений метод дослідження напруженого стану ізотропної півплощини і смуги з отворами і тріщинами. *Теоретична і прикладна механіка*. 2004. Вип. 39. С. 83-93.

10. Калоеров С. А. Розв'язування основних задач теорії пружності для півплощини з отворами і тріщинами. *Теоретична і прикладна механіка*. 1998. Вип. 28. С. 157-171.

11. Кравець В. Напружено-деформований стан площини з періодичною системою отворів з крайовими тріщинами або смугами пластичності. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 44-47.

12. Онишко Л. Й., Варивода Ю. Ю., Пономаренко О. М. Дослідження динамічної концентрації напружень на краю колового отвору за дії на нього неосесиметричного навантаження. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького*. 2011. 13, № 4 (50), ч. 4. С. 106-114.

13. Пономаренко О. Напруження в безмежній тонкій пластині з круговим включенням і круговим отвором: *Збірник наукових праць 11-ї Міжнародної наукової конференції «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур»* / за заг.ред. Р.М. Кушніра і Ю.В.Токового. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 2024. Вип.6. С.137-138.

14. Пономаренко О., Семерак В., Гавриляк О. Концентрація напружень в пластині з двома рівними круговими отворами при розтягу під кутом до лінії центрів отворів. *Вісник Львівського національного університету природокористування «Агроінженерні дослідження»*. 2022. № 26. С. 77-90.

15. Пономаренко О., Бурнаєв О., Семерак В., Гавриляк О. Розподіл напружень в півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю. *Вісник Львівського національного університету*

природокористування «Агроінженерні дослідження». 2024. № 28. С. 65-74.

16. Проценко В., Українець Н. Аналіз напружено-деформованого стану півпростору з нескінченною циліндричною порожниною. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 85-87.

17. Савин Г. Н. Розподіл напружень біля отворів. Київ: Наукова думка, 1968. 887 с.

18. Слободян М., Цуркан М. Розтяг пластини з круговим отвором та двома радіальними тріщинами з урахуванням пластичних зон поблизу їх вершин. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 96-98.

19. Сучасні проблеми концентрації напружень : праці Міжнар. наук. конф, присвяченої 75-річчю академіка НАН України А. С. Космодам'янського (м. Донецьк, 21-25 червня 1998 р.). Донецьк, 1998. 287 с.

20. Соляр Т., Максимович О. Регуляризація формули обернення перетворення Лапласа стосовно вивчення концентрації динамічних напружень у пластинках з отворами. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 161-163.

21. Сучасні проблеми механіки і математики: праці Міжнар. наук. конф., присвяч. 90-річчю від дня народження академіка НАН України Я. С. Підстригача (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018.

22. Тужеляк О. Вплив зміни напрямку ортотропії на динамічну поведінку пластини з отворами за дії розподіленого навантаження на її поверхні: *Збірник наукових праць 11-ї Міжнародної наукової конференції «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур»* / за заг.ред. Р.М. Кушніра і Ю.В. Токового. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 2024. Вип.6. С.169-170.

23. Шопа Т. Дослідження динамічної поведінки ортотропних пластин з отворами та включеннями. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф.* (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 168-169.

Стаття надійшла 03.02.2025

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ПІД ЧАС НАЛАШТУВАННЯ ДЖЕРЕЛА ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ ІНВЕРТОРНОГО ТИПУ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ НА ПРИКЛАДІ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АПАРАТА TPS 2700 СМТ

*Олексій Швець, к. т. н., Петро Коруняк, к. т. н., Сергій Березовецький, к. т. н.,
Іван Городецький, к. т. н., Роман Шеремета, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: shvets2882@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.151-160>

Швець О., Коруняк П., Березовецький С., Городецький І., Шеремета Р. Дослідження синергетичного ефекту під час налаштування джерела зварювального струму інверторного типу з мікропроцесорним керуванням на прикладі зварювального апарата TPS 2700СМТ

Джерела зварювального струму інверторного типу з мікропроцесорним керуванням ефективно забезпечують процеси механізованого та автоматичного зварювання. Джерела живлення сучасних зварювальних півавтоматів здатні забезпечувати ефект синергетичного керування. Цей ефект базується на використанні мікропроцесорних систем (мікроконтролерів) для вибору та забезпечення оптимальних величин, параметрів імпульсів і виду зварювального струму, з урахуванням марки, товщини та властивостей металу виробу, а також особливостей зварювальних матеріалів: діаметра та марки дроту, виду та складу захисного газу тощо. Синергетичний режим дає змогу користувачеві змінювати всі налаштування зварювального апарата шляхом зміни лише одного параметра процесу зварювання. Однак інформація, відображена в інструкції з експлуатації зварювального апарату, не дає змоги оператору швидко підготувати його до роботи. Вивчення особливостей налаштування кожного з доступних процесів зварювання дає змогу сформулювати чіткий алгоритм послідовності та меж регулювання параметрів роботи джерела живлення, а також розробити практичні рекомендації для підготовки його до роботи.

Експериментальні дослідження проведено з метою визначення впливу синергетичного режиму на параметри процесу MIG/MAG зварювання. У процесі досліджень вивчено функціональні можливості півавтомата TPS 2700 СМТ у режимах Standard, Synergic, Pulse Synergic та Cold Metal Transfer, а також вплив параметрів процесу зварювання на якість зварних швів.

На основі аналізу особливостей налаштування кожного з доступних процесів зварювання та дослідження впливу синергетичного режиму на процес налаштування необхідних параметрів роботи зварювального джерела встановлено межі регулювання параметрів процесу зварювання. Отримано залежності параметрів роботи зварювального джерела, від яких залежить ефективність та якість процесів зварювання. Встановлено, що значення сили зварювального струму, швидкості подачі дроту та напруги зварювання залежать від товщини зварюваних деталей та діаметра електрода. Отримані залежності мають різний характер для різних режимів зварювання. Виявлено, що значення досліджуваних параметрів суттєво впливають на форму та розміри зварних швів.

Результати досліджень можуть бути використані під час розроблення практичних рекомендацій щодо особливостей використання зварювального апарата TPS 2700 СМТ на різних зварювальних операціях.

Ключові слова: MIG/MAG зварювання, інверторне джерело живлення, параметри процесу зварювання, налаштування зварювального апарата.

Shvets O., Koruniak P., Berezovetskyi S., Horodetskyi I., Sheremeta R. Study of the synergistic effect when setting up an inverter-type welding current source with microprocessor control using the example of the TPS 2700SMT welding machine

Inverter-type welding power sources equipped with microprocessor control can facilitate mechanized and automatic welding processes. Modern semi-automatic welding machines are designed to offer synergistic control, which utilizes microprocessor systems (microcontrollers) to select and ensure optimal values for pulse parameters and the type of welding current. This is achieved while considering factors such as the brand, thickness, and properties of the metal being welded, as well as the characteristics of the welding materials, including the diameter and brand of wire and the type and composition of shielding gas. The synergistic effect allows the user to adjust all settings of the welding machine by changing only one parameter of the welding process. However, the information provided in the operating instructions often does not enable the operator to quickly prepare the machine for use. By studying the specific settings for each available welding process, it is possible to develop a clear algorithm detailing the sequence and limits for adjusting the parameters of the power source, along with practical recommendations for preparing it for work.

Experimental studies were conducted to assess the influence of synergism on the parameters of the MIG/MAG welding process. The research focused on the functional capabilities of the TPS 2700 CMT semi-automatic machine across various modes, including Standard, Synergic, Pulse Synergic, and Cold Metal Transfer. Additionally, the study examined how welding process parameters affect the quality of welds.

Through this investigation, the specific features of setting up each available welding process were analyzed, and the influence of synergism on the adjustment of necessary welding source parameters was assessed. The limits for adjusting these parameters were established, and relationships were defined showing how the parameters of the welding source impact the efficiency and quality of the welding process. It was found that the values of welding current, wire feed speed, and welding voltage are closely related to the thickness of the welded parts and the diameter of the wire. These relationships exhibit different characteristics for various welding modes. Furthermore, the studied parameters significantly influence the shape and dimensions of the welds. The results of this research can inform practical recommendations regarding the use of the TPS 2700 CMT welding machine in diverse welding operations.

Keywords: MIG/MAG welding, inverter power source, welding process parameters, welding machine settings.

Постановка проблеми. Джерела зварювального струму інверторного типу з мікропроцесорним керуванням здатні забезпечувати процеси механізованого та автоматичного зварювання суцільним дротом у середовищі захисних газів, порошковим дротом, а також ручне електродугове зварювання штучними покритими або неплавкими вольфрамовими електродами [1-2; 19; 21]. Крім того, воно дозволяє виконувати процес MIG/MAG зварювання у кількох режимах [12; 19; 22]:

- режим синергетичного MIG/MAG зварювання (Synergic);
- режим імпульсного синергетичного MIG/MAG зварювання (Pulse Synergic);
- режими холодного перенесення металу (CMT, CMT-Pulse);
- режим звичайного ручного MIG/MAG зварювання (Manual).

Джерело живлення TPS 2700 CMT, як і більшість сучасних зварювальних півавтоматів, здатне забезпечувати ефект синергетичного керування. Цей ефект (синергетика) базується на використанні мікропроцесорних систем (мікроконтролерів) для вибору та забезпеченню оптимальних величин, параметрів імпульсів і виду зварювального струму, з урахуванням марки, товщини та властивостей металу виробу, а також особливостей зварювальних матеріалів: діаметра та марки дроту, виду та складу захисного газу тощо. Синергетика дозволяє користувачу змінювати всі налаштування зварювального апарата, змінюючи лише один з параметрів процесу зварювання. Якщо, наприклад, змінити на апараті товщину зварюваних деталей, це спричинить зміну зварювального струму та напруги, швидкості подачі дроту і вплине на індуктивність дуги і кількість імпульсів у ланцюзі змінного струму [10; 14; 16]. Встановлення необхідних параметрів роботи зварювального джерела живлення забезпечує високу ефективність процесу зварювання та якість зварних з'єднань.

Зварювальний апарат для MIG/MAG зварювання TPS 2700 CMT призначений для використання у різних технологічних процесах завдяки наявності значної кількості методів та режимів зварювання. Його органи керування дозволяють швидко налаштувати необхідні параметри процесу, є досить інформативними та зручними. Однак інформація, відображена в інструкції з експлуатації зварювального апарату, не дозволяє оператору швидко підготувати його до роботи. Вивчення особливостей налаштування кожного з доступних процесів зварювання дозволить сформулювати чіткий алгоритм послідовності та меж регулювання параметрів роботи джерела живлення, а також розробити практичні рекомендації щодо підготовки його до роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За рекомендаціями [12; 22] налаштування параметрів процесу MIG/MAG зварювання апаратом TPS 2700 CMT починають із вибору потрібного способу зварювання. Для цієї моделі джерела живлення доступні чотири основні режими механізованого зварювання. Далі для обраного режиму вибирають тип присадкового матеріалу (зварювального дроту), його діаметр та необхідний захисний газ.

Залежно від способу використання зварювального обладнання та параметрів зварного з'єднання в апараті цієї марки передбачено можливість вибору необхідного режиму роботи (2-тактного, 4-тактного, спеціального 4-тактного або точкового зварювання) [15]. Однак слід пам'ятати, що у деяких випадках параметри, налаштовані на панелі управління одного з компонентів зварювальної системи (наприклад, пристрої подачі дроту або пульта дистанційного керування), не можна змінити на панелі керування джерела струму. Так, наприклад, під час використання пальників із функцією регулювання всі значення параметрів, задані за допомогою регулятора та кнопок, зберігаються до наступної зміни. Це правило також діє у разі

тимчасового вимкнення та повторного вмкнення джерела струму [6; 10; 22].

Під час підготовки зварювального апарата до роботи оператор обирає один із параметрів, за яким задається потужність зварювання. Такими параметрами є товщина зварюваних кромок, зварювальний струм і напруга або швидкість подачі дроту [13]. Значення обраного параметра встановлюють за допомогою регулятора, а його величина відображається на цифровому дисплеї, розташованому над ним. Перелічені параметри процесу безпосередньо пов'язані між собою. Оскільки зварювальний півавтомат працює в синергетичному режимі, для налаштування режиму зварювання достатньо змінити один із них, після чого інші автоматично встановлюються відповідним чином [7; 12].

У деяких випадках для досягнення оптимальних результатів зварювання необхідно корегувати процес під час зварювання шляхом зміни додаткових параметрів, а саме довжини та динаміки дуги. Для корекції довжини дуги в апараті TPS 2700 CMT можна здійснювати корекцію довжини дуги. Мінусові значення цього параметра відповідають меншій довжині дуги, а додатні – більшій [8].

При MIG/MAG зварюванні в режимі «Synergic» існує можливість корекції сили відриву крапель (корекції динаміки дуги), що дозволяє корегувати енергію відриву крапель розплавленого металу. При стандартному MIG/MAG зварюванні із режимом «Synergic» це дозволяє змінювати динаміку короткого замикання у момент переходу крапель металу, забезпечуючи більш жорстку та стабільну дугу (мінусові значення), нейтральну дугу (нульове значення) та м'якшу дугу з меншою кількістю бризок при додатних значеннях динаміки [12; 18; 22].

Технологія стандартного ручного MIG/MAG зварювання – це зварювання без функції «Synergic». Зміна одного з параметрів автоматично не змінює налаштування усіх інших. Усі параметри роботи зварювального півавтомата необхідно налаштувати окремо відповідно до вимог процесу зварювання [5; 15]. У разі вибору стандартного MIG/MAG зварювання у ручному режимі для корегування користувачу доступні швидкість подачі дроту, зварювальна напруга, корекція динаміки короткого замикання у момент переходу крапель металу. Значення зварювального струму відображається лише як індикатор фактичного значення.

Для налаштування параметрів, необхідних для зварювання з використанням «CMT» процесу потрібно вибрати один із способів зварювання: «CMT» або «CMT-PULS» [5; 11; 22]. Під час вибору

цього процесу, окрім сталевих і нержавіючих дротів, стають доступними присадкові матеріали для зварювання сталі та алюмінію, а також для MIG-пайки (CuSi 3, AlSi 5 тощо) [3–4; 17–18; 20; 23]. Корекція довжини дуги при «CMT»-зварюванні здійснюється аналогічно до способу «Synergic». Однак корекція динаміки, залежно від обраного присадного матеріалу та діаметра дроту, дозволяє регулювати різні параметри:

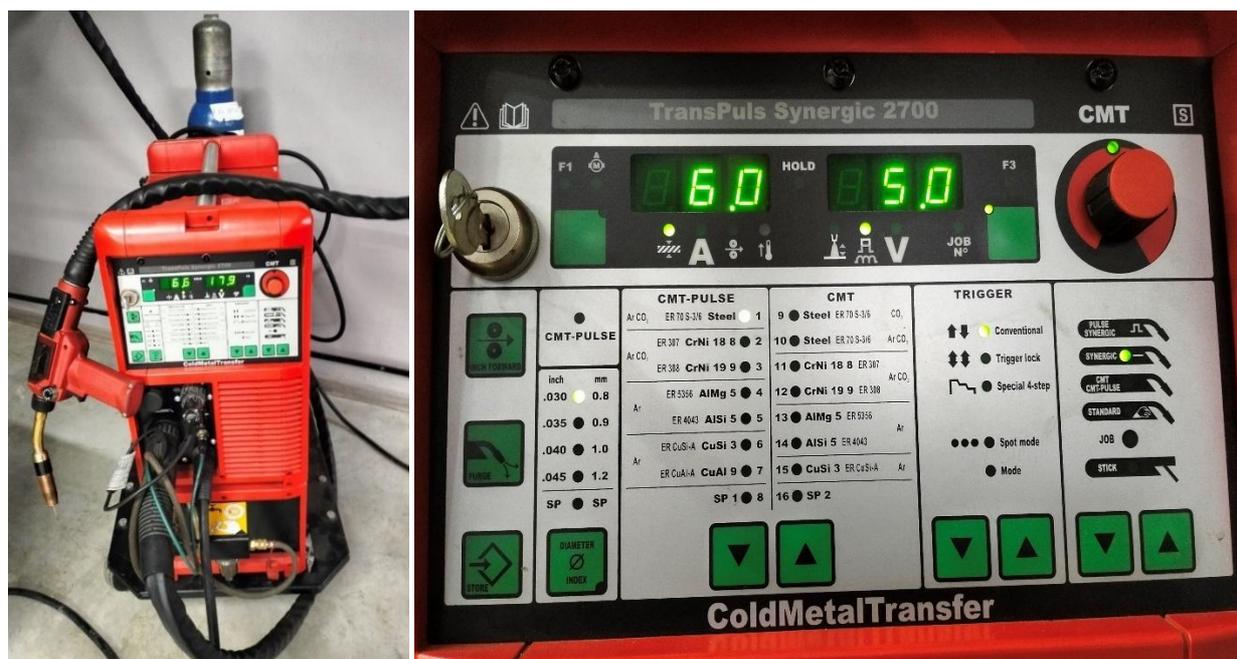
- 1) налаштування додаткового струму для керування тепловим впливом на матеріал;
- 2) зміни динаміки короткого замикання у момент переходу крапель металу;
- 3) налаштування циклів пульсування при гарячому старті;
- 4) налаштування часу гарячого старту;
- 5) корекція імпульсу для плавного регулювання сили відриву крапель.

Постановка завдання. Наше завдання – визначення функціональних можливостей зварювального півавтомата Trans Puls Synergic 2700 CMT, а саме встановлення впливу синергетики на залежності струму та напруги зварювання від товщини зварюваних деталей, впливу заданого діаметра зварювального дроту на швидкість його подачі, струм та напругу зварювання та вплив корекції довжини дуги на напругу зварювання та якість зварних швів.

Виклад основного матеріалу. Завдання експериментальних досліджень полягало у визначенні впливу синергетики на параметри процесу MIG/MAG-зварювання. У процесі досліджень півавтомат TPS 2700 CMT міг працювати в чотирьох різних режимах роботи: «Standard» – стандартний; «Synergic» – синергетичний; «Pulse Synergic» – пульсуючий синергетичний; «Cold Metal Transfer» (CMT) – холодне перенесення металу. На цих режимах здійснювали дослідження функціональних можливостей півавтомата та впливу параметрів процесу зварювання на якість зварних швів (рис. 1) [9; 17].

У налаштуваннях джерела живлення задавали постійну товщину зварюваної деталі та визначали значення струму зварювання $I_{зв}$, швидкості подачі дроту V_d і напруги зварювання $U_{зв}$ за різних режимів роботи півавтомата. Під час досліджень значення діаметра зварювального дроту було задано 1,2 мм. Отримані результати досліджень наведені в табл. 1.

Залежності параметрів процесу зварювання від товщини металу відображені на рис. 2–4.



а)

б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та панель керування (б) зварювального півавтомата Trans Puls Synergic 2700 CMT

Fig. 1. General view (a) and control panel (b) of the Trans Puls Synergic 2700 CMT semi-automatic welding machine

Таблиця 1. Результати досліджень впливу товщини металу на параметри процесу MIG/MAG зварювання півавтоматом TPS 2700 CMT (при $d_d = 1,2$ мм)

Table 1. Results of studies of the influence of metal thickness on the parameters of the MIG/MAG welding process with the TPS 2700 CMT semi-automatic welding machine (at $d_d = 1.2$ mm)

Товщина деталі δ , мм	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкості подачі дроту $V_{д}$, м/хв	Напруги зварювання $U_{зв}$, В
1	2	3	4
Pulse Synergic			
1	47	1,3	17,2
4	186	5,0	23,3
7	257	7,2	25,6
Synergic			
2	136	3,6	16,3
4	216	5,6	18,7
6	270	7,3	26,2
CMT			
1	92	4,3	10,1
2	202	8,7	18,8
3	225	9,6	20,5
Standard			
*	-	22	17,5

* У режимі Standard значення товщини деталі і струму на дисплеї джерела живлення Fronius TPS 2700 CMT не відображаються. Можна змінювати тільки швидкість подачі дроту. Інші параметри можна визначити тільки під час горіння дуги [12].

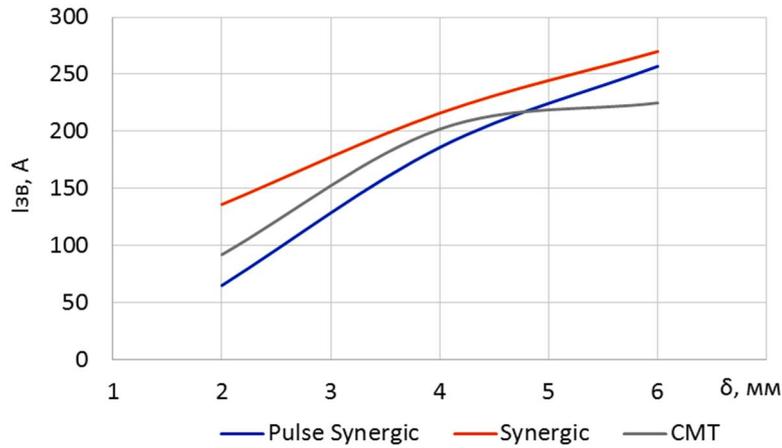


Рис. 2. Залежності сили зварювального струму від товщини деталі
Fig. 2. Dependences of welding current on the thickness of the part

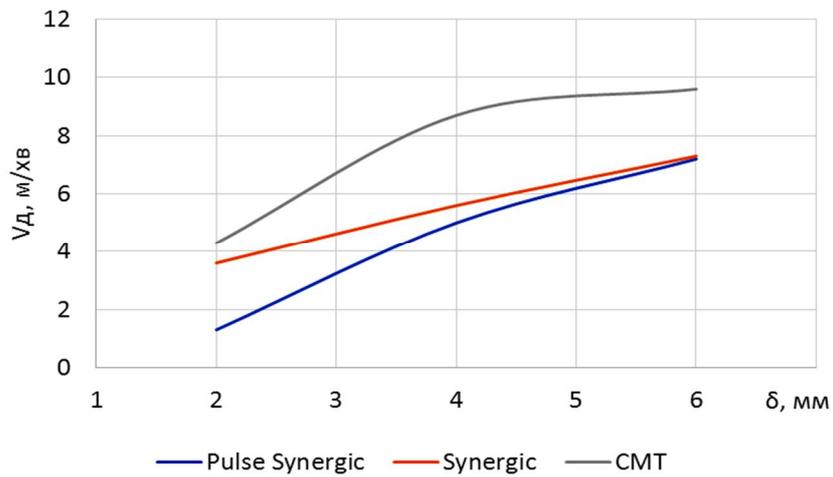


Рис. 3. Залежності швидкості подачі дроту від товщини деталі
Fig. 3. Dependences of wire feed speed on the thickness of the part

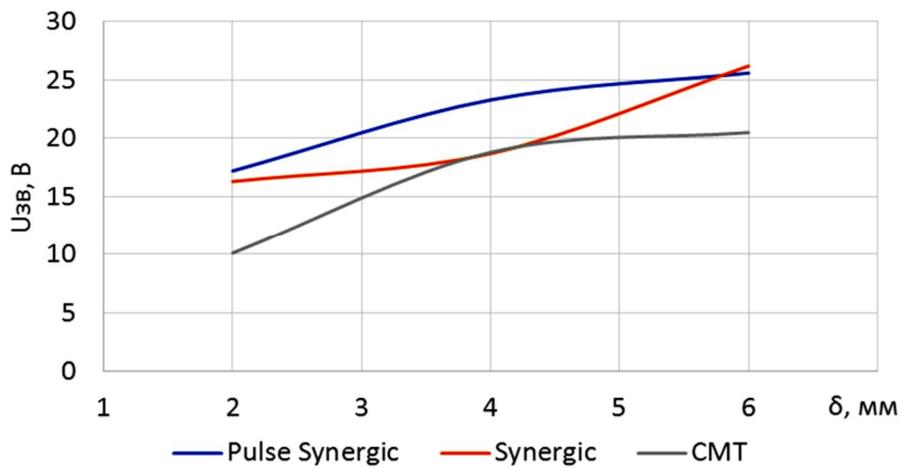


Рис. 4. Залежності напруги зварювання від товщини деталі
Fig. 4. Dependences of welding voltage on the thickness of the part

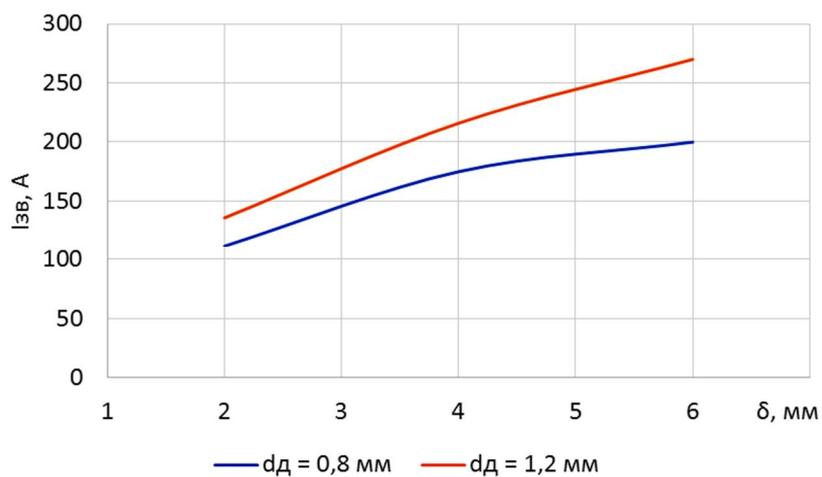


Рис. 5. Залежності швидкості подачі дроту від діаметра дроту
Fig. 5. Dependences of wire feed speed on the wire diameter

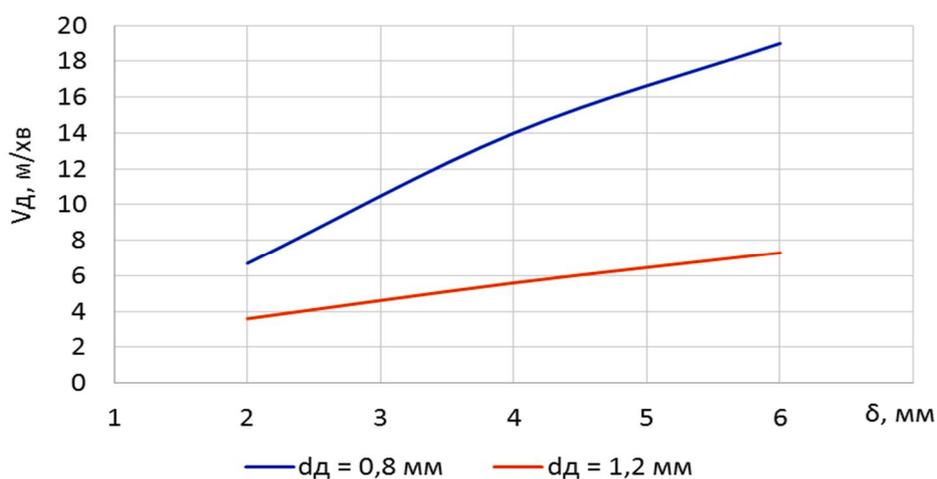


Рис. 6. Залежності зварювального струму від його діаметра
Fig. 6. Dependences of welding current on its diameter

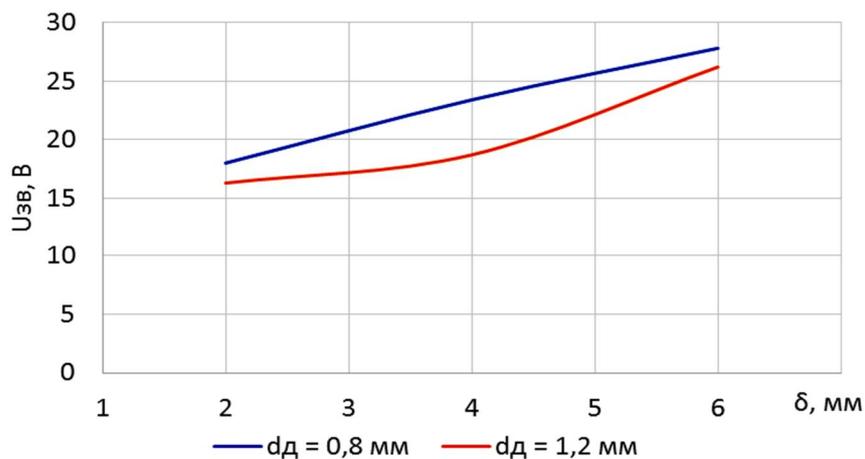


Рис. 7. Залежності напруги зварювання від діаметра дроту
Fig. 7. Dependences of welding voltage on wire diameter

З метою визначення впливу діаметра дроту на параметри процесу, які задає джерело живлення з урахуванням синергетичного ефекту, досліджували ті ж характеристики при встановленні значення діаметра дроту 0,8 мм. Результати наведені в табл. 2.

Вплив товщини зварювального дроту на параметри процесу MIG/MAG зварювання з урахуванням синергетики джерела живлення на прикладі режиму Synergic відображені на рис. 5–7.

Під час експериментальних досліджень впливу корекції дуги на інші параметри роботи зварювального півавтомата було встановлено, що цей параметр не впливає на значення зварювального струму та подачі дроту. Вплив корекції дуги проявляється тільки на значеннях напруги зварювання, про що свідчать дані, наведені в табл. 3.

Залежність напруги зварювання від корекції дуги відображає рис. 8.

Таблиця 2. Результати досліджень впливу товщини металу на параметри процесу MIG/MAG зварювання півавтоматом TPS 2700 CMT (при $d_d = 0,8$ мм)

Table 2. Results of studies of the influence of metal thickness on the parameters of the MIG/MAG welding process with the TPS 2700 CMT semi-automatic welding machine (at $d_d = 0.8$ mm)

Товщина деталі δ , мм	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкості подачі дроту V_d , м/хв	Напруги зварювання $U_{зв}$, В
Pulse Synergic			
2	73	6,0	19,6
4	135	12,0	23,7
6	174	16,3	25,5
8	225	22,0	28,7
Synergic			
2	112	6,7	18,0
4	175	14,0	23,4
6	200	19,0	27,8
8	245	22,0	31,5

Таблиця 3. Результати досліджень впливу корекції довжини дуги на параметри роботи півавтомата TPS 2700 CMT (режим Synergic)

Table 3. Results of studies of the influence of arc length correction on the operating parameters of the TPS 2700 CMT semi-automatic machine (Synergic mode)

Товщина деталі δ , мм	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкості подачі дроту V_d , м/хв	Напруги зварювання $U_{зв}$, В
Корекція -15			
2	113	6,8	15,3
4	176	14,2	20,1
6	200	19,0	23,7
Корекція +15			
2	111	6,6	17,9
4	175	14,1	23,4
6	201	19,1	27,9

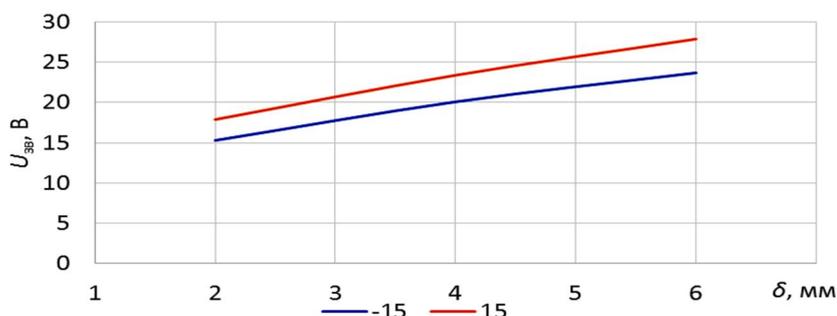


Рис. 8. Залежності напруги зварювання від корекції дуги
Fig. 8. Dependences of welding voltage on arc correction

Вплив корекції дуги на якість процесу зварювання можна оцінити за світлинами зварних швів (рис. 9). Під час досліджень встановлювали мінусові значення корекції довжини дуги, після чого виконували зварне з'єднання таврового шва без зазорів. Інший шов виготовляли за додатних значень корекції дуги. Результати дослідження впливу корекції дуги на значення інших параметрів роботи джерела живлення наведені в табл. 3. Максимальні значення корекції становлять -30 та +30 [12; 22]. Зразки зварних

швів, виконаних при корекції -15 та +15 в режимі Synergic наведені на рис. 9. У результаті експерименту встановлено, що мінусові значення корекції дуги дозволяють отримувати менш випуклий зварний шов. Розбризування металу мінімальне і характерне дрібними бризками (рис. 9, а). При зварюванні з додатковим значенням корекції дуги шов більш нерівномірний за шириною та висотою, а процес зварювання супроводжувався розбризуванням крупніших частинок розплавленого металу (рис. 9, б).



а)



б)

Рис. 9. Кутові зварні шви, виконані при корекції довжини дуги -15 (а) та +15 (б)
Fig. 9. Fillet welds performed with arc length correction -15 (a) and +15 (b)



а)



б)



в)

Рис. 10. Зварні шви, виконані на різній динаміці дуги
Fig. 10. Welds performed at different arc dynamics

Приклади зварних швів, виконаних при різних варіантах налаштування динаміки дуги, наведені на рис. 10. Під час експериментальних досліджень динаміку дуги змінювали від мінімального -5 до максимального +5 значень [22]. Зварювання виконували в режимі Pulse Synergic.

Як бачимо із рис. 10, а, зварний шов, виконаний із мінімальною динамікою дуги, вийшов тоншим порівняно з іншими варіантами. Крім того, «лусочки» шва мали більшу протяжність уздовж шва.

При зварюванні на нульовій динаміці дуги шов більш розпливчастий, із чіткою рівномірною лускатістю по всій довжині (див. рис. 10, б).

Максимальне значення динаміки дуги забезпечує м'якшу дугу з меншою кількістю бризок. Крім того, шов виходить розпливчастий, із дрібною лускатістю (рис. 10, в).

Висновки. Аналіз конструкції зварювального апарата TPS 2700 СМТ показав можливість його використання в різних технологічних процесах зварювання завдяки наявності значної кількості методів та режимів MIG/MAG та MMA зварювання. Його органи керування дозволяють швидко налаштовувати необхідні параметри процесу, є досить інформативними та зручними. Проаналізувавши його функціональні можливості, встановлено можливість виконання механізованого зварювання у восьми різних режимах, серед яких імпульсне та синергетичне зварювання, зварювання з холодним перенесенням металу та звичайне ручне MIG/MAG зварювання.

Розглянувши особливості налаштування кожного з доступних процесів зварювання та дослідивши вплив синергетики на процес налаштування необхідних параметрів роботи зварювального джерела, було встановлено межі регулювання параметрів процесу зварювання. У результаті досліджень функціональних можливостей зварювального джерела TPS 2700 СМТ отримані залежності параметрів його роботи, від яких залежить ефективність та якість процесів зварювання. Встановлено, що значення сили зварювального струму, швидкості подачі дроту та напруги зварювання залежать від товщини зварюваних деталей та діаметра дроту. Крім того, ці залежності мають різний характер для різних режимів зварювання. Також встановлено, що значення досліджуваних параметрів суттєво впливають на форму та розміри зварних швів.

Отримані результати досліджень можуть бути використані під час розробки практичних рекомендацій щодо особливостей використання

зварювального апарата TPS 2700 СМТ на різних зварювальних операціях.

Бібліографічний список

1. Гуменюк І. В., Іваськів О. В., Гуменюк О. В. Технологія електродугового зварювання: підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
2. Драган С. В. Джерела живлення для зварювання плавленням: навч. посіб. Миколаїв: УДМТУ, 2002. 320 с.
3. ДСТУ EN ISO 14171:2015 Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дрот електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом нелегованих та дрібнозернистих сталей. Класифікація (EN ISO 14171:2010, IDT; ISO 14171:2010, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82838 (дата звернення: 03.02.2025).
4. ДСТУ ISO 14175:2004 Матеріали зварювальні. Захисні гази для дугового зварювання та різання (ISO 14175:1997, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50209 (дата звернення: 03.02.2025).
5. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання: навч. посіб. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
6. Пальники для роботизованого зварювання MIG/MAG. URL: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/informatsiya-pro-produkt/palnyky-robotyzovanoho-zvaryvannya-mig-mag?referer=>. (дата звернення: 03.02.2025).
7. Хаскін В. Ю., Коржик В. М., Бернацький А. В., Войтенко А. М., Ілляшенко С. В., Саї Д. Особливості прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 з використанням випромінювання дискового лазера. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 4. С. 29–33. <https://doi.org/10.37434/as2020.04.04>.
8. Швець О., Березовецький С., Коруняк П. Вплив корекції дуги на параметри процесу MIG/MAG зварювання. Indicators characterizing the role of transport in regional management infrastructure development. *The Future of Science, Technology and Economy: Collection of Scientific Papers «International Scientific Unity» with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference*. March 19–21, 2025. Sofia, Bulgaria. 349–352 p. <https://doi.org/10.70286/isu-19.03.2025>.
9. Швець О. П., Березовецький С. А., Коруняк П. С. Вплив параметрів режиму MIG-пайки на формування зварного шва. *Perspectives of contemporary science: theory and practice. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. SPC —Sci-conf.com.ua*. Lviv, Ukraine, 2024. Pp. 341–344. URL: <https://sciconf.com.ua/> (дата звернення: 03.02.2025).
10. Швець О., Березовецький С., Коруняк П., Баранович С., Шеремета Р. Вплив режимів MIG-паяння на параметри зварних швів з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. № 28. С. 25–31. <https://doi.org/10.31734/agroengineering> 2024.28.024.

11. Швець О. П., Талабко Ю. І. Технологічний комплекс для відновлення спрацьованих деталей наплавлюванням. *Modern research in world science. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. SPC -Sci-conf.com.ua*. Lviv, Ukraine. 2022. Pp. 21–27. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modernresearch-in-world-science-7-9-08-2022-lviv-ukrayina-arhiv/> (дата звернення: 03.02.2025).
12. Швець О. П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас. Методичні рекомендації до виконання практичної роботи на тему «Вивчення конструкції та органів керування зварювального апарата Trans Puls Synergic 2700 CMT» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Дубляни: ЛНУП, 2023. 15 с.
13. EVS-EN 1011-1: 2009. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. General guidance for arc welding.
14. Frank Armao et al. Gas Metal Arc Welding Guidelines. URL: www.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/e205.pdf. (дата звернення: 03.02.2025).
15. Guide to MIG/MAG welding. E & O. E. Wilkinson Star Ltd 2017. URL: <https://www.weldingandwelder.com/wp-content/uploads/2015/05/MIG-Welding> (дата звернення: 03.02.2025).
16. H. L. Wei, H. K. D. H. Bhadeshia, S. A. David & T. DebRoy. Harnessing the scientific synergy of welding and additive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019. <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1615189>.
17. ISO 5817:2003. Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections.
18. Menglei Cai et al. The influence of arc length correction on welding in CMT welding. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 170 042106. 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042106>.
19. MIG/MAG. Навчальні документи. URL: [https://www.fronius.com/~downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW_TD_MIG_MAG.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW_TD_MIG_MAG.pdf). (дата звернення: 03.02.2025).
20. Mir Qurrat Ul Ain, Deepak Kumar Naik, Dinesh Kumar Rajendran, Shiva Sekar. Comprehensive analysis of experimental studies in cold metal transfer welding. *Discover Applied Sciences*. 2025. № 7. С. 590. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07065-3>.
21. Tobias Manuel Vilas-Boas Rosado. Innovation in the MIG/MAG process: Productivity analysis and Fume Emissions. URL: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137855389/Article%20-%20Innovation%20in%20the%20MIG-MAG%20Process%20-%20Productivity%20analysis%20and%20Fume%20Emissions.pdf>. (дата звернення: 03.02.2025).
22. Trans Synergic 4000/5000 Trans Puls Synergic 2700 Trans Puls Synergic 3200/4000/5000 TIME 5000 Digital CMT 4000 Advanced. Джерела струму MIG/MAG. Інструкція з експлуатації. URL: <https://www.fronius.com/~downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%20C0426%20C0114%20CRU.pdf>. (дата звернення: 03.02.2025).
23. YANG Xiu-rong. MIG/MAG welding of ultrathin plate-CMT cold-metal transition technology [J]. *Electric Welding Machine*. 2006. № 36 (6). С. 5–7.

Стаття надійшла 06.02.2025

Розділ 7
**МОДЕЛЮВАННЯ МАШИН, ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ
В АГРОІНЖЕНЕРІЇ**

УДК 621.682

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В РОБОЧІЙ ЗОНІ
БОРОШНОМЕЛЬНОГО ВАЛЬЦЯ**

*Олексій Бурнаєв, к. ф.-м. н., Віктор Семерак, к. т. н., Олександр Пономаренко, к. ф.-м. н.,
Іван Городецький к. т. н., Ольга Лиса, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: semerakviktor@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.161-165>

Бурнаєв О., Семерак В., Пономаренко О., Городецький І., Лиса О. Математичне моделювання теплопередачі в робочій зоні борошномельного вальця

У статті представлено розширене аналітичне та чисельно-аналітичне дослідження теплопередачі в робочій зоні борошномельного вальця, де під час взаємодії зернової маси з металевою поверхнею формується інтенсивне й просторово нерівномірне тепловиділення. Показано, що тепло, яке виникає внаслідок сил тертя, пластичної деформації та часткового руйнування зерен, значною мірою накопичується в контактній зоні та визначає характер підвищення температури поверхні вальця, а також впливає на якість готового продукту. На основі класичної моделі рухомих джерел тепла Єгера сформовано аналітичну залежність для опису температурного профілю в безрозмірних координатах, що дозволяє універсально застосовувати результати для вальців різних типорозмірів та конструкцій. Розглянуто вплив числа Пекле, геометричних параметрів зони контакту, теплопровідності матеріалу та величини питомого теплового потоку на формування температурного поля. Встановлено, що максимальна температура виникає поблизу вихідного краю зони контакту, де спостерігається найбільший інтегральний вплив джерела тепла. Зі збільшенням числа Пекле пікове значення температури знижується, але зона прогріву суттєво подовжується за межі контакту, що вказує на зміну механізму теплоперенесення. Чисельні обчислення, виконані шляхом інтегрування функцій розподілу тепловиділення, підтвердили справедливість моделі для широкого діапазону режимів роботи вальцових верстатів. Досліджено ефективність внутрішнього рідинного охолодження та показано, що воно знижує середній температурний рівень, але майже не впливає на локальне перегрівання. Запропоновано заходи інтенсифікації тепловідведення, серед яких попереднє охолодження зерна, оптимізація швидкості обертання та застосування локального вискоефективного охолодження безпосередньо у зоні контакту. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення теплового режиму вальцових систем та підвищення якості борошномельної продукції.

Ключові слова: теплова зона контакту, розподіл температури, борошномельний валець, число Пекле, теплопередача, аналітичне моделювання, охолодження вальців, тепловий режим, механічне подрібнення зерна, енергоефективність.

Burnaiev O., Semerak V., Ponomarenko O., Horodetskyi I., Lysa O. Mathematical modeling of heat transfer in the working zone of a flour mill roller

The article presents an extended analytical and numerical study of heat transfer processes occurring in the working zone of a flour milling roller, where intensive and spatially non-uniform heat generation arises during the interaction between the grain mass and the metallic roller surface. It is demonstrated that heat produced by friction, plastic deformation, and partial fracture of grain accumulates within the contact region and strongly determines the temperature rise on the roller surface, ultimately influencing product quality. Based on Jaeger's classical theory of moving heat sources, an analytical model is developed to describe the temperature distribution in dimensionless coordinates, enabling the application of the results to rollers of various sizes and structural configurations. The influence of the Peclet number, thermal conductivity, geometric characteristics of the contact zone, and heat flux intensity on the formation of the temperature field is analyzed in detail. The study shows that the maximum temperature occurs near the trailing edge of the contact zone, where the cumulative thermal effect is the strongest. Increasing the Peclet number reduces the peak temperature, yet considerably extends the downstream heated region, reflecting a shift in the balance between heat diffusion and roller surface velocity. Numerical simulations based on double integration of the heat-release distribution validate the analytical model across a wide range of milling regimes. The effectiveness of internal liquid cooling is investigated, revealing that it reduces the average temperature but provides only limited mitigation of local overheating within the contact area. Several strategies for improving thermal management are proposed, including pre-cooling of the grain, optimization of rotational parameters, and the use of localized high-intensity cooling methods. The results obtained contribute to improving the thermal stability, operational efficiency, and product quality in roller milling systems.

Keywords: thermal contact zone, temperature distribution, flour mill roller, Peclet number, heat transfer, analytical modeling, roller cooling, thermal regime, mechanical grinding of grain, energy efficiency.

Постановка проблеми. У процесі помелу зерна у вальцьових верстатах (рис. 1) відбувається інтенсивне виділення тепла, зумовлене тертям та деформацією зернової маси. Частина цього тепла відводиться вальцем, проте значна його кількість залишається у продукті, що може призводити до перегріву борошна та погіршення його якості. Внутрішнє охолодження вальця, яке здійснюється прокачуванням рідини, не забезпечує ефективного зниження температури в безпосередній зоні контакту. При цьому розподіл температури по поверхні вальця залежить від конструктивних параметрів, швидкості обертання, умов контакту й теплопровідності матеріалів. Відсутність достатньо точних моделей теплопередачі в таких системах ускладнює прогнозування температурних режимів і розробку оптимальних методів охолодження. Тому виникає потреба у створенні аналітичних моделей, здатних описати динамічний розподіл тепла в зоні взаємодії вальця із зерновою масою та наданні практичних рекомендацій для зниження перегріву продукту.

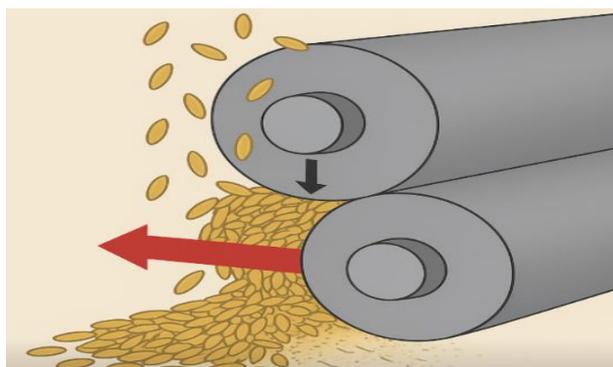


Рис. 1. Зображення борошномельних вальців
Fig. 1. Image of flour milling rollers

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження поєднують класичну аналітику рухомих джерел тепла (Jaeger) [5] з чисельними моделями й експериментальними вимірами у млиновій практиці. Це дає змогу як отримувати загальні безрозмірні висновки (наприклад, роль числа Пекле), так і порівнювати їх із реальними профілями температури роликів та продукту. Класична аналітика рухомого (стрічкового) джерела тепла, викладена Jaeger (1943), залишається базовою для задач ковзного / рухомого нагріву поверхонь і дає явні безрозмірні співвідношення, які використовуються для інтерпретації даних про вальці.

На її основі розвивалися теорії контактного і роликвого нагріву (оглядні результати у Vejan

[3], що пояснюють розподіл тепла при роликвому контакті та вплив параметрів руху й дифузії тепла.

Сучасні статті (наприклад Aderghal et al., 2011) [1] поєднують аналітичні рішення для рухомої теплової смуги з чисельними FEM / FDM розв'язками для переходу задач ковзного контакту, включаючи ефект охолодження поза зоною контакту та часові інтеграли джерела. Такі роботи підтверджують, що аналітичні наближення коректні в широкому діапазоні Pe , але для врахування об'ємного розподілу джерела або шорсткості потрібні чисельні моделі.

Постановка завдання. У процесі механічної роботи – деформації та руйнування органічного матеріалу під дією тертя й розтирання зерна – на поверхні борошномельних вальців виділяється тепло, яке розподіляється між самим вальцем, продуктом помелу та частково навколишнім повітрям [4; 11; 13; 15]. За умов високої енергоємності виробництва це тепловиділення стає відчутним і більше впливає на якість кінцевого продукту, ніж на міцність чи надійність обладнання. Оскільки контакт між зерном і вальцем є неідеальним, а борошно характеризується низькою теплопровідністю, частина тепла не відводиться навіть за наявності примусового охолодження вальців, що іноді призводить до перегріву продукту. Тому аналітичне моделювання процесів теплопередачі в таких системах залишається важливим завданням, попри накопичений значний практичний досвід їх експлуатації.

Метою дослідження є аналіз температурного режиму робочої зони борошномельного вальця при механічному подрібненні зерна та визначення основних чинників, що впливають на нагрів поверхні та продукту. Для цього необхідно виконати такі завдання:

1. Математичне моделювання тепловиділення:

- розглянути процес тепловиділення від зерна до поверхні вальця, приймаючи тепловиділення в зоні контакту постійним у першому наближенні;
- встановити залежності між тепловим потоком, параметрами вальця (матеріал, геометрія, швидкість обертання) та характеристиками нагріву.

2. Аналітичний розрахунок температурного поля:

- використати аналітичні методи для визначення температурного розподілу по поверхні вальця та у приповерхневій зоні зернової маси;
- врахувати вплив числа Пекле (Pe) на максимальну температуру та ширину прогріву.

3. Чисельне моделювання та побудова профілів температури:

- розрахувати безрозмірні температурні профілі в робочій зоні за допомогою чисельної інтеграції функцій розподілу тепла;

- порівняти отримані профілі для різних швидкостей обертання та параметрів вальців.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо процеси теплопередачі в робочій зоні вальця, вважаючи його поверхню ідеально циліндричною та ігноруючи її шорсткість. Кількість енергії, що виділяється в зоні контакту, а отже, й тепловий потік h можна визначити експериментально – порівнянням споживаної потужності обладнання під навантаженням і без нього. Такі вимірювання дозволяють оцінити коефіцієнт корисної дії всього агрегату без необхідності деталізувати втрати в двигуні, приводі чи окремих вузлах тертя.

Припустимо, що під час розмелу певної порції зерна ця маса внаслідок стискання поводить як суцільне нагріте тіло з температурою ϑ_1 , яке контактує з холоднішою поверхнею вальця ϑ_2 . Оскільки аналітичний опис процесу взаємодії зернової маси з вальцем під час розмелу є неповним, вважаємо, що між ними існує нерівномірне тангенціальне ковзання. При цьому тепловиділення приймається сталим уздовж контактної ділянки (через складність його точного визначення) і оцінюється за споживаною потужністю обладнання. З огляду на малу площу контакту порівняно з довжиною твірної вальця, у першому наближенні тепловий потік \mathbf{H} визначатимемо за формулою

$$\dot{H} = 4 \cdot k \cdot a \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (1)$$

де $k = k_1 \cdot k_2 / (k_1 + k_2)$; k_1 – коефіцієнт теплопровідності спресованої зернової маси; k_2 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу вальця; a – довжина дуги контакту вальця з продуктом.

З огляду на значну різноманітність типорозмірів борошномельних вальців, задачу теплопровідності доцільно розглядати у безрозмірних координатах. Враховуючи, що зона контакту a є малою порівняно з радіусом кривизни поверхні вальця R , для визначення температури його поверхні можна використати аналітичні результати, подані Єгером [5] для випадку рухомого стрічкового джерела тепла. У цій постановці процес вважається стаціонарним, причому замість руху поверхні відносно нерухомого джерела розглядається еквівалентний варіант – переміщення джерела вздовж поверхні. Це не змінює фізичної суті задачі, але дозволяє описати температурне

поле в тілі як функцію координат, а не часу. Нехтуючи крайовими ефектами поблизу торців вальця, приймаємо задачу двовимірною, вважаючи джерело тепла рівномірно розподіленим уздовж нескінченної смуги шириною $2a$, паралельної осі вальця. Таке розподілене джерело можна трактувати як сукупність точкових джерел інтенсивності h , розташованих вздовж прямої. За умови відомого тангенціального розподілу тепла в зоні контакту задача має чисельний розв'язок. Виконавши заміну часу t на координати положення матеріалу (x, z) з урахуванням швидкості обертання вальця ω та його радіуса R , отримуємо вираз $(x - R\omega t, z)$, який дозволяє пов'язати температуру в точці з її розташуванням відносно зони тепловиділення.

Без детального наведення класичних розрахунків, що впливають з рівнянь нестационарної теплопровідності, за умови незначних розмірів зони контакту між вальцем і борошном, розподіл температури на його поверхні поблизу області дотику можна подати у вигляді виразу

$$\bar{\vartheta} = \vartheta_0 + \frac{ha}{kL^{1/2}} F(L, X), \quad (2)$$

де ϑ_0 – температура на значній відстані від поверхні вальця (у нашому випадку – температура охолоджувальної рідини, що циркулює всередині циліндра); $L = R\omega a / 2\kappa$ – число Пекле; $X = R\omega x / 2\kappa$ – безрозмірна відстань вздовж поверхні; κ – коефіцієнт теплопровідності зовнішнього шару вальця.

Виходячи з формули (2) встановлено, що максимальна температура, навіть за умови рівномірного теплового потоку вздовж зони нагріву, досягається поблизу її кінця, оскільки саме ця ділянка найдовше перебуває під дією теплового впливу. Величини максимальної та середньої температур у зоні нагріву визначаються параметром Пекле «L», який можна трактувати як відношення швидкості обертання (або лінійної швидкості поверхні) до швидкості теплопровідності в матеріалі. За великих швидкостей обертання ($L > 5$) протягом часу проходження точки через зону нагріву тепло встигає проникнути у валець лише на незначну глибину. У такому випадку тепловий потік майже по всій поверхні спрямований практично перпендикулярно до неї.

Температурне поле точки в межах зони контакту визначається виразом

$$\bar{\vartheta} = \vartheta_0 + \frac{h}{k} \left(\frac{4\kappa a}{\pi R\omega} (1+x) \right)^{1/2}, \quad (3)$$

де $\vartheta = \frac{\pi k R \omega}{4 h a \kappa}$ – безрозмірна температура

Отримані результати подано на рис. 2, 3. Розрахунки проводилися у середовищі MathCad 2000 Professional із використанням вбудованих алгоритмів числового інтегрування. При цьому як умовна «мінус нескінченність» за часом приймався інтервал, що відповідає одному повному оберту вальця.

На рис. 2 подано характер зміни температури поверхні робочої зони за умови руху джерела тепла зліва направо. На початку ділянки контакту спостерігається найвищий темп зростання температури, тоді як максимальне її значення досягається наприкінці зони нагріву. Після цього температура знижується, що супроводжується зломом температурної кривої та зміною її кривизни.

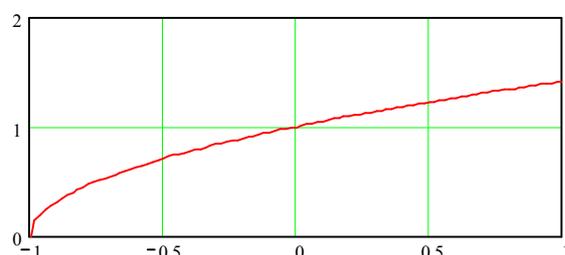


Рис. 2. Відносне перевищення температури вальця у робочій зоні $[-a, a]$ над температурою теплоносія зростає по кореневому закону

Fig. 2. The relative excess of the roller temperature in the working zone $[-a, a]$ over the coolant temperature increases according to the root law

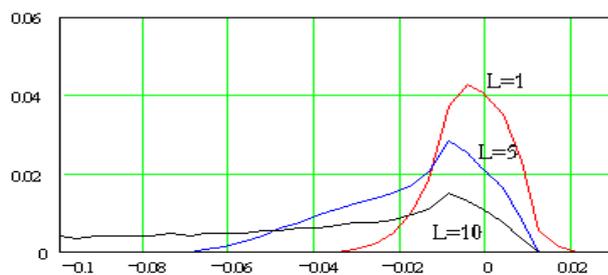


Рис. 3. Температура приповерхневої зони вальця в околі точки дотику з зерном залежно від числа Пекле L (розрахунки велись для $L=1, 5, 10$)

Fig. 3. Temperature of the surface zone of the roller in the vicinity of the point of contact with the grain depending on the Peclet number L (calculations were carried out for $L=1, 5, 10$)

Використовуючи результати дослідження [2] та співвідношення (2), побудовано залежність температурного поля в безпосередньому околі поверхні вальця від моменту проходження зони контакту з борошном. Для цього застосовано числове інтегрування подвійних інтегралів від функції

розподілу тепловиділення, що моделювалося у вигляді точкового джерела сталої інтенсивності, переміщеного вздовж відрізка зони контакту. Інтегрування виконувалося по площі контакту та часовій змінній у межах від мінус нескінченності до нуля.

Як бачимо (див. рис. 3), за малих чисел Пекле (наприклад, $L=1$, що відповідає найвищій кривій) температура поверхні вальця наближається до симетричного розподілу відносно зони контакту. У цьому випадку максимальне значення температури є відносно високим, однак прогрів навколишнього матеріалу за межами зони контакту залишається незначним.

Зі зростанням числа Пекле спостерігається зниження пікової температури, водночас розширюється зона нагріву поверхні вальця за межами контакту з продуктом. При цьому на графіку з'являється характерний злам у точці завершення зони нагріву, що свідчить про зміну механізму теплопереносу.

Для визначення температурного поля безпосередньо в зоні розмелу зерна, де теплова дія має найбільше значення, використання формули (3) є некоректним, оскільки вона не враховує об'ємного тепловиділення, зумовленого деформацією зерна, та співвідношення цієї складової з теплом, що виникає внаслідок тертя в парі «зерно – валець». Оцінити потужність внутрішніх джерел тепла, не відведених борошномельним вальцем, можна експериментально – за допомогою вимірювання температури одиниці об'єму продукту після помелу. Такі результати доцільно використовувати для коригування (або заміни на експериментально встановлене значення) формули (1).

Середнє значення температури в зоні контакту може бути розраховане за співвідношенням

$$\bar{\vartheta}_{mean} \approx \vartheta_0 + \frac{4}{3} \frac{ha}{k} (\pi L)^{-1/2}. \quad (4)$$

Аналіз формули (4) свідчить, що питомий тепловий потік h робить суттєвіший внесок у підвищення температури, ніж число Пекле L , оскільки у вираз він входить у вищому степені (на $1/2$). Водночас величини h та L є взаємопов'язаними через параметри зони контакту a , швидкість обертання та радіус вальця, від яких залежить як число Пекле (формула (2)), так і значення теплового потоку [6; 7–10; 12; 14].

Висновки

1. Показано, що питомий тепловий потік h має більший вплив на зростання температури поверхні вальця, ніж число Пекле L , оскільки входить у формулу у вищому степені (на $1/2$).

2. Встановлено кореляцію між величинами h та L , що зумовлена параметрами зони контакту a , швидкістю обертання та радіусом вальця.

3. Аналітична модель побудована з використанням низки спрощень: прийнято гіпотезу про сталість тепловиділення в зоні контакту, проігноровано вплив шорсткості поверхні та співвідношення між тепловими ефектами від тертя й деформації зерна.

4. Якісний аналіз показав, що при високих швидкостях обертання максимальна температура поверхні зменшується, за умови збереження сталої продуктивності обладнання.

5. Встановлено, що внутрішнє охолодження вальця циркуляцією рідини знижує лише середнє температурне значення, не забезпечуючи ефективного охолодження в зоні контакту.

6. Рекомендовано застосування попереднього охолодження зерна та поверхні вальця перед подачею у робочу зону.

7. Як перспективний напрям запропоновано дослідити доцільність локального охолодження за допомогою розпиленої вуглекислоти (сухого льоду), що забезпечує інтенсивне випаровування саме в найбільш нагрітих ділянках і тим самим підвищує ефективність теплового режиму.

Бібліографічний список

1. Aderghal M., Kezzar M., Cheknane A. Thermal analysis of a moving heat source with application to tribological contacts. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, Iss. 14–15. P. 2545–2553. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.021.
2. Barber J. R. Thermal effects of sliding contact. *Tribology International*. 2014. Vol. 79. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.001.
3. Bejan A. *Convection Heat Transfer*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 688 p.

4. Campbell G. M., Webb C., Pandiella S. S. Roller milling of wheat: quality, processing, and thermal effects. *Journal of Cereal Science*. 2011. Vol. 54, Iss. 2. P. 193–202. DOI: 10.1016/j.jcs.2011.05.002.

5. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2011. 510 p.

6. Fang Q., Zhang X., Li B. Heat transfer characteristics in rolling contact under high-speed conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 98. P. 350–360. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.042.

7. Heisel U., Eisseler R., Schaal M. Thermal loads in high-speed rolling contacts. *Production Engineering*. 2014. Vol. 8, Iss. 2. P. 197–204. DOI: 10.1007/s11740-013-0507-9.

8. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 1072 p.

9. Lim S. C., Ashby M. F. Wear mechanism maps. *Acta Materialia*. 2010. Vol. 35, Iss. 1. P. 1–24. DOI: 10.1016/0001-6160(87)90209-4.

10. Meng H.-C., Ludema K. C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*. 2010. Vol. 181–183. P. 443–457. DOI: 10.1016/0043-1648(95)90158-2.

11. Posner E. S., Hibberd S. Thermal damage in cereal milling processes. *Biosystems Engineering*. 2013. Vol. 116, Iss. 3. P. 312–320. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2013.08.002.

12. Riahi A. R., Jabbari M. Modeling of heat generation in rolling contact with friction. *Journal of Heat Transfer*. 2012. Vol. 134, Iss. 3. Article 031301. DOI: 10.1115/1.4005268.

13. Scanlon M. G., Dexter J. E. Role of heat generation in flour milling. *Cereal Chemistry*. 2012. Vol. 89, Iss. 4. P. 179–186. DOI: 10.1094/CCHEM-01-12-0006-R.

14. Wang Y., Li Y., Zhang H. Numerical simulation of temperature distribution in roller milling. *Powder Technology*. 2017. Vol. 305. P. 356–364. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.030.

15. Zohdi T. I. *Mechanics of Granular Media: Modeling, Computations, and Applications*. Berlin: Springer, 2015. 320 p. DOI: 10.1007/978-3-662-45224-9.

Стаття надійшла 15.02.2025

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ЗОНІ ТЕРТЯ
ШОРСТКИХ ПОВЕРХОНЬ**

*Михайло Семерак¹, д. т. н., Віктор Семерак², к. т. н., Тарас Бубняк², к. ф.-м. н.,
Олексій Бурнаєв², к. ф.-м. н., Олександр Пономаренко², к. ф.-м. н., Оксана Говда²*

¹ НУ «Львівська політехніка», вул. Митрополита Андрея, 5, Львів, Україна, 79013

² Львівський національний університет природокористування,

вул. Володимира Великого, 1, Дубляни, Львівський район, Львівська область, Україна

e-mail: semerakviktor@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.166-171>

Семерак М., Семерак В., Бубняк Т., Бурнаєв О., Пономаренко О., Говда О. Математичне моделювання процесів теплопередачі в зоні тертя шорстких поверхонь

У статті виконано аналітичне дослідження нестационарних процесів теплопередачі в зоні тертя шорстких твердих тіл із круговою контурною площею контакту. Модель базується на об'єднанні рівняння теплопровідності півпростору та модифікованого закону контактної взаємодії, який враховує реальну мікрогеометрію поверхні через параметр шорсткості β . Показано, що значення β визначає розмір контурної ділянки контакту та впливає на фактичний розподіл контактної тиску, який у випадку шорстких поверхонь суттєво відрізняється від класичного герцівського рішення. Використано квазігерцівський розподіл тиску, що дозволило коректно описати збільшення реальної площі контакту при малих навантаженнях та підвищених значеннях шорсткості.

Для розв'язання нестационарної задачі застосовано інтегральні перетворення Ганкеля та Лапласа, що дало змогу отримати аналітичний вираз для температурного поля в будь-якій точці півпростору. На основі отриманих залежностей проведено числовий аналіз впливу параметра шорсткості β , форми контактної тиску та інтенсивності фрикційного тепловиділення на максимальну температуру й просторовий розподіл температур. Встановлено, що зі збільшенням β температура в центрі контактної зони зменшується внаслідок збільшення контурної площі та відповідного розподілу теплового потоку.

Отримані результати узгоджуються з відомими теоретичними та експериментальними даними інших авторів щодо впливу мікрогеометрії на фрикційне нагрівання. Запропонована модель може бути використана для оцінювання теплового стану вузлів тертя машин, зокрема дискових гальм, муфт зчеплення, підшипників ковзання та кочення. Модель підвищує точність прогнозування температурних максимумів, що є важливим для забезпечення надійності та довговічності трибологічних систем.

Ключові слова: фрикційне нагрівання, шорсткість поверхні, контурна площа контакту, теплопровідність, інтегральні перетворення, температурне поле, півпростір.

Semerak M., Semerak V., Bubniak T., Burnaiev O., Ponomarenko O., Hovda O. Mathematical modeling of heat transfer processes in the friction zone of rough surfaces

The paper presents an analytical study of transient heat transfer processes occurring in the frictional contact zone of rough solid bodies with a circular contour contact area. The mathematical model combines the heat conduction equation for a half-space with a modified contact interaction law that accounts for the real micro-geometry of the surface through the roughness parameter β . It is shown that the value of β determines the size of the contour contact region and significantly affects the actual pressure distribution, which, for rough surfaces, differs markedly from the classical Hertz solution. A quasi-Hertzian pressure profile is employed to accurately describe the increase in real contact area under low loads and elevated roughness levels.

To solve the transient problem, the Hankel and Laplace integral transforms are applied, yielding an analytical expression for the temperature field at any point within the half-space. Based on the obtained formulas, a numerical analysis of the influence of the roughness parameter β , the pressure distribution, and the frictional heat flux on the peak temperature and its spatial distribution is conducted. It is established that an increase in β leads to a decrease in the maximum temperature in the contact center due to the enlargement of the contour contact area and the corresponding redistribution of thermal energy.

The results demonstrate good agreement with published analytical and experimental findings by other authors concerning the influence of surface micro-geometry on frictional heating. The proposed model can be applied to the thermal assessment of frictional components such as disc brakes, clutches, sliding and rolling bearings. The approach improves the accuracy of predicting temperature peaks, which is crucial for enhancing the reliability and durability of tribological systems.

Keywords: frictional heating, surface roughness, contour contact area, thermal conductivity, integral transformations, temperature field, half-space.

Постановка проблеми. У процесах тертя ковзання та кочення між контактуючими твердими тілами відбувається інтенсивне тепловиділення в зоні контакту. Це зумовлює локальне підвищення температури, яке, своєю чергою, впливає на зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, інтенсивність зносу, виникнення термічних деформацій і можливі пошкодження поверхневих шарів. Точна оцінка температурного поля у зоні контакту є ключовою для прогнозування працездатності трибологічних вузлів, таких як гальмівні системи, муфти зчеплення, підшипники та інші елементи машин.

Класичні аналітичні моделі розрахунку температури у твердих тілах під дією фрикційного навантаження базуються на припущенні про ідеально гладкі поверхні та суцільну контактну площу. Однак у реальних умовах поверхні мають мікронерівності, які істотно змінюють характер розподілу теплового потоку та температурного поля. Ігнорування шорсткості може призвести до суттєвих похибок у визначенні максимальних температур і теплових напружень.

Отже, актуальним є розроблення аналітичних методів визначення нестационарного температурного поля у шорсткому півпросторі під дією кругового фрикційного джерела тепла з урахуванням реальної (контурної) площі контакту та модифікованого розподілу тиску.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класична модель рухомого джерела тепла (Jaeger) [11] залишається базовою для опису локального нагріву при ковзанні: вона дає аналітичні вирази для температурних полів у півпросторі і дозволяє ввести безрозмірні параметри (наприклад Péclet), що керують формою профілю температури. Ці результати часто слугують нульовим наближенням у сучасних роботах.

Останні теоретичні праці розвивають рішення для рухомих або імпульсних джерел (стрічкові, кругові) і порівнюють аналітичні формули з чисельними розв'язками. Роботи типу Aderghal et al. [10] показують, коли аналітика (рухоме джерело) дає прийнятну точність, а коли необхідно застосовувати FEM/CFD для урахування тривимірних ефектів, охолодження поза зоною та об'ємного джерела тепла.

Сучасні дослідження контактної механіки показують, що реальна (контурна) площа контакту між шорсткою і гладкою поверхнями значно перевищує прогноз Герца, особливо при невеликих навантаженнях і високій шорсткості. Пояснення – множинні мікроасперитети, пластична деформація

та статистична природа поверхонь; це прямо впливає на розподіл тиску та локальну інтенсивність тепловиділення. Значна література останніх років підкреслює необхідність врахування реальної площі контакту у теплових задачах [6; 7].

Дослідження, що вводять квазігерцівські або еліптичні профілі тиску (замість ідеального герцівського), демонструють:

- контурна площа збільшується → локальні контактні зони більші;
- це призводить до зниження пік-температур при тій же питомій дисипації (енергії), бо теплове джерело розподілене на ширшу площу;
- ефект особливо помітний у слабонавантажених з'єднаннях (дискові гальма, муфти). Ці висновки підтверджують емпіричні спостереження і теоретичні моделі коригованого тиску. Сучасні публікації активно комбінують аналітику з чисельними методами:
 - FEM/CFD моделювання теплових полів у контакті з реалістичною геометрією;
 - швидкі чисельні інтегратори (QAGI, спеціалізовані процедури для функцій Бесселя) для обернених перетворень;
 - машинне навчання для прогнозу істинної контактної площі за топографією (нові роботи 2021-2025 рр.). Це дає змогу перевіряти аналітичні наближення і виводити поправки.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення нестационарного розподілу температури в півбезмежному тілі із шорсткою поверхнею, що перебуває у фрикційному контакті із гладкою поверхнею за умов ковзання зі сталою швидкістю. Для цього необхідно врахувати реальну геометрію контактної взаємодії, яка характерна хвилястістю поверхні, та вплив шорсткості на теплові процеси в зоні контакту [1-4].

Завдання зводиться до розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності в півпросторі з урахуванням граничних умов, що описують тепловий потік від фрикційного джерела змінної інтенсивності. При цьому розподіл контактного тиску моделюється квазігерцівським законом, який відображає вплив шорсткості поверхні на контурну ділянку контакту.

Необхідно отримати аналітичний вираз для температурного поля в довільній точці півпростору під час перехідних процесів, а також проаналізувати вплив параметра шорсткості та розподілу тиску на максимальні температури в зоні контакту.

Виклад основного матеріалу. Під час визначення розмірів контурної ділянки контакту

було враховано деформацію шорсткості поверхні шляхом використання розподілу контактної тиску, який відрізняється від класичного герцівського та має квазігерцівський характер, наближений до еліптичного закону розподілу.

$$p(r) = p_{\beta} \left[1 - \left(\frac{r}{a_{\beta}} \right)^2 \right]^{\beta}, \quad (1.1)$$

$$p_{\beta} = \frac{P(1+\beta)}{\pi a_{\beta}^2}, \quad r \leq a_{\beta}.$$

У співвідношенні (1.1) r – радіальна складова циліндричної системи координат (r, z) з віссю z , направленою в середину сферичного сегмента; a_{β} – радіус ділянки контакту; β – параметр, що характеризує шорсткість поверхні [15].

Радіус контурної ділянки контакту a_{β} визначається із співвідношень [3]

$$\frac{a_{\beta}}{a_{1/2}} = G(\beta), \quad \frac{1}{2} \leq \beta \leq \frac{1}{\alpha},$$

де

$$G(\beta) = \sqrt[3]{\frac{8}{3\pi(1-\alpha\beta)} \{G_2(\beta) + \alpha\beta[G_3(\beta) - G_1(\beta)]\}},$$

$$G_1(\beta) = (1+\beta)B \left(1 + \beta, \frac{1}{2} \right),$$

$$G_2(\beta) = \frac{1}{4}(1+\beta)(1+2\beta)B \left(1 + \beta, \frac{1}{2} \right),$$

$$G_3(\beta) = \frac{1}{\pi}(1+\beta)B^2 \left(1 + \beta, \frac{1}{2} \right),$$

$$\alpha = \frac{2}{2\omega + 1}, \quad \omega = 2 \text{ або } 3$$

(залежно від способу обробки поверхні [9]; параметр ω – це безрозмірний коефіцієнт, який характеризує вплив шорсткості поверхні на реальну (контурну) площу контакту; $\omega > 1$ – реальна площа контакту більша, ніж у гладких тіл (поверхня має мікронерівності з плоскими вершинами)). Параметр β є безрозмірною характеристикою шорсткості поверхні, що показує, у скільки разів реальний радіус контурної ділянки контакту перевищує герцівський радіус для ідеально гладких поверхонь. Типові значення β змінюються від 1 до 3 залежно від способу обробки: $\beta \approx 1$ характерне для шліфованих і поліруваних поверхонь, $\beta \approx 1.5-2$ – для токарної та фрезерної обробки, $\beta \approx 2-3$ – для грубих, литих або зношених поверхонь. $a_{1/2}$ – радіус ділянки контакту, розрахований при герцівському тиску.

Залежність $a_{\beta}/a_{1/2}$ параметра від величини параметра β наведено на рис. 1. Із зменшенням навантаження та підвищенням класу шорсткості робочих поверхонь пари тертя значення $a_{\beta}/a_{1/2}$ зростає. При цьому доцільно розрізняти два типи трибоз'єднань: плоскі та криволінійні. До першого типу, який відзначається великими значеннями β , належать, зокрема, фрикційні елементи дискових гальм і муфти зчеплення [14]. Як видно з графіків на рис. 1, використання формули Герца для визначення контурної площі контакту в цьому випадку призводить до істотних похибок. Другий тип трибоз'єднань – це підшипники ковзання та кочення, кулачкові механізми тощо. Для них характерні значно вищі контактні тиски (на 2-3 порядки більші, ніж у трибоз'єднаннях першого типу), що зумовлює відповідні значення параметра $\beta \approx 0,5$.

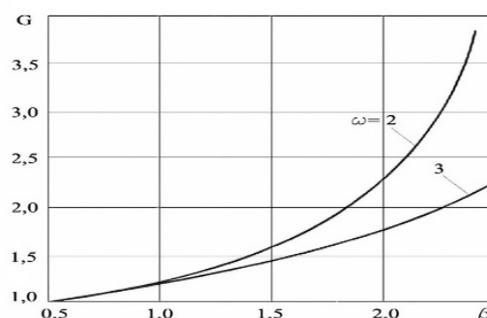


Рис. 1. Залежність $a_{\beta}/a_{1/2}$ від величини параметра β

Fig. 1. Dependence $a_{\beta}/a_{1/2}$ on the value of the parameter β

У процесі тертя на контактній площадці утворюється тепло, яке створює тепловий потік, спрямований на нагрів нерівностей поверхні [5; 8]. З урахуванням співвідношення (1.1), інтенсивність цього теплового потоку, що проходить через контурну зону контакту в сферу, визначається як

$$q(r) = \gamma f V p(r) H(a_{\beta} - r), \quad (1.2)$$

де $p(r)$ – контактний тиск у зоні дотику $0 \leq r \leq a_{\beta}$, близький до розподілу Герца (1.1).

Нестаціонарний температурний розподіл $T_{\beta}(r, z, t)$ у півбезмежному тілі із шорсткою поверхнею під дією теплового потоку (1.2) у будь-який момент часу визначається з розв'язку нестаціонарного рівняння теплопровідності, записаного в безрозмірних змінних $\rho = r/a_{\beta}, Z = z/a_{\beta}$ у такій формі:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T_{\beta}}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 T_{\beta}}{\partial Z^2} = \frac{a_{\beta}^2}{k} \frac{\partial T_{\beta}}{\partial t},$$

$$\rho \geq 0, Z \geq 0, t > 0. \quad (1.3)$$

Розв'язок рівняння (2.3) повинен відповідати початковій умові

$$T_{\beta} = 0 \text{ при } t = 0 \quad (1.4)$$

і граничній умові

$$\frac{\partial T_{\beta}}{\partial Z} = \begin{cases} -\Lambda_{\beta} (1 - \rho^2)^{\beta}, & \rho \leq 1, Z = 0, t > 0, \\ 0, & \rho > 1, Z = 0, t > 0, \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial T_{\beta}}{\partial \rho} = 0 \text{ при } \rho = 0, 0 \leq Z < \infty, t > 0 \quad (1.6)$$

та умові регулярності

$$T_{\beta} \rightarrow 0 \text{ при } \rho \rightarrow \infty, Z \rightarrow \infty. \quad (1.7)$$

В умові (1.5) позначено

$$\Lambda_{\beta} = \gamma q_0 a_{\beta} / K; \quad q_0 = fVp_{\beta}.$$

Під час розв'язання крайової задачі (1.3)-(1.7) послідовно використовують інтегральне перетворення Ганкеля за радіальною координатою та перетворення Лапласа за часом:

$$\bar{T}_{\beta}(\xi, z, t) = \int_0^{\infty} \rho T_{\beta}(r, z, t) J_0(\xi \rho) d\rho \quad (1.8)$$

$$\bar{\bar{T}}_{\beta}(\xi, z, s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \bar{T}_{\beta}(\xi, z, t) dt, \quad (1.9)$$

для трансформанти температури отримуємо

$$\bar{\bar{T}}_{\beta}(\xi, z, s) = \frac{\Lambda_{\beta}}{s\kappa} \varphi_{\beta}(\xi) e^{-\kappa z},$$

$$\kappa^2 = \xi^2 + \frac{s}{k}, \quad (1.10)$$

де

$$\varphi_{\beta}(\xi) = 2^{\beta} \Gamma(\beta + 1) J_{\beta+1}(\xi) / \xi^{\beta+1}. \quad (1.11)$$

Застосувавши до співвідношення (1.10) формули обернення інтегральних перетворень Ганкеля та Лапласа й повернувшись від трансформант до оригінальних функцій, отримуємо вираз для шуканого температурного поля у вигляді

$$T_{\beta}(r, z, t) = \Lambda_{\beta} \int_0^{\infty} \varphi_{\beta}(\xi) J_0(\xi \rho) \Phi(\xi, Z, Fo) d\xi. \quad (1.12)$$

У виразі (1.12) позначено:

$$\Phi(\xi, Z, Fo) = \frac{1}{2} \left[e^{-\xi Z} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} - \xi\sqrt{Fo} \right) - e^{\xi Z} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + \xi\sqrt{Fo} \right) \right], \quad (1.13)$$

де $Fo = kt / a_{\beta}^2$.

Формула (1.12) задає температуру в будь-якій точці півпростору під час нестационарних процесів. Найвищі температурні значення спостерігаються в центрі контактної зони $\rho = 0, Z = 0$ в установившому режимі $t \rightarrow \infty, Fo \rightarrow \infty$.

$$T_{\beta, \max}^{\infty} = \Lambda_{\beta} \frac{\Gamma(\beta + 1) \sqrt{\pi}}{2\Gamma(\beta + 1, 5)}. \quad (1.14)$$

Для часткового випадку герцівського розподілу контактної зони з (1.14) при $\beta = 1/2$ отримуємо [13]

$$T_{1/2, \max}^{\infty} = \Lambda_{1/2} \pi / 4. \quad (1.15)$$

Беручи до уваги (1.15), перейдемо в (1.12) до безрозмірної температури

$$T_{\beta}^*(\rho, Z, Fo) = \frac{T_{\beta}(r, z, t)}{T_{1/2, \max}^{\infty}} = \lambda_{\beta} \int_0^{\infty} \varphi_{\beta}(\xi) J_0(\xi \rho) \Phi(\xi, Z, Fo) d\xi, \quad (1.16)$$

де $\lambda_{\beta} = \frac{8(1 + \beta)a_{1/2}}{3\pi a_{\beta}}$.

Обчислення інтеграла у правій частині виразу (1.16) виконано з використанням модифікованої схеми QAGI [12] у поєднанні з процедурою BESJP для обчислення функцій Бесселя $J_{\beta}(\cdot)$ [13; 14].

Результати числового аналізу температурного поля подано у вигляді графіків на рис. 1.2–1.4. На цих графіках суцільні криві відображають випадок $\beta = 0,5$ – герцівського розподілу контактної зони, характерного для важконавантажених режимів роботи вузлів тертя, тоді як штрихові лінії відповідають випадку $\beta = 1,5$.

На рис. 2 наведено залежність максимальної температури в центрі контактної області від параметра шорсткості β . Помітно, що за сталого рівня енергії дисипації (який характеризується комплексом fVP) зі збільшенням β від 0,5 (мінімального значення цього параметра) до 2,5 спостерігається зниження температури.

На рис. 3 показано розподіл максимальної поверхневої температури $T_{\beta, \max}^*(\rho, 0)$ уздовж радіальної координати, а на рис. 4 – зміни $T_{\beta, \max}^*(0, Z)$ уздовж аксіальної координати вглиб матеріалу. Спостерігається, що зі збільшенням відстані від центру контактної зони значення $T_{\beta, \max}^*(\rho, 0)$ монотонно зменшується. Аналогічна тенденція характерна і для температурного

розподілу $T_{\beta,\max}^*(0, Z)$ у глибинних шарах шорсткого півпростору.

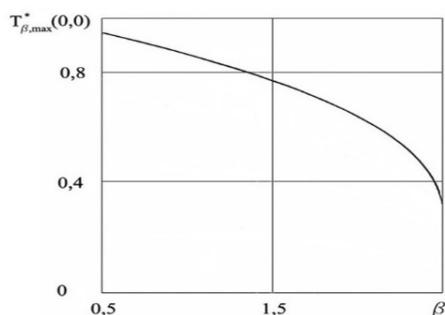


Рис. 2. Залежність пікової температури в центрі контактної зони від значення параметра шорсткості β
Fig. 2. Dependence of the peak temperature in the center of the contact zone on the value of the roughness parameter β

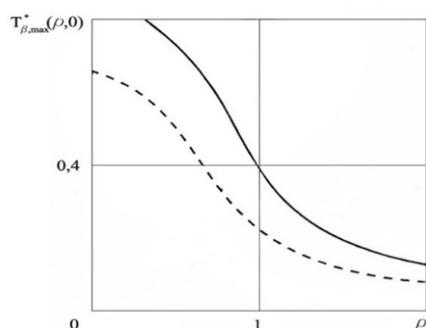


Рис. 3. Зміна максимальної температури $T_{\beta,\max}^*(\rho, 0)$ на поверхні вздовж радіальної координати
Fig. 3. Change in maximum surface temperature $T_{\beta,\max}^*(\rho, 0)$ along the radial coordinate

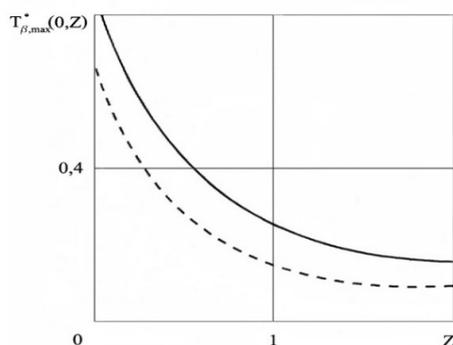


Рис. 4. Розподіл значень температури $T_{\beta,\max}^*(0, Z)$ вздовж аксіальної координати в глибину півпростору
Fig. 4. Distribution of temperature values $T_{\beta,\max}^*(0, Z)$ along the axial coordinate into the depth of the half-space

Отримані нами залежності температурного поля для шорсткого півпростору добре узгоджуються з основними тенденціями, наведеними в роботах інших дослідників, які аналізували фрикційне нагрівання з урахуванням мікрогеометрії поверхні.

По-перше, характерна зміна максимальної температури зі збільшенням параметра шорсткості β якісно співпадає з даними аналітичних та чисельних моделей, у яких реальна (контурна) площа контакту зростає із збільшенням шорсткості. Відомо, що розширення контактної зони за рахунок мікронерівностей призводить до зниження пікових температур, оскільки тепловий потік розподіляється на більшу площу. Така сама тенденція була встановлена у класичних моделях статистичних поверхонь (теорії Грінвуда-Вільямсона) та в сучасних квазігерцівських моделях, де профіль тиску відхиляється від ідеального герцівського при малих навантаженнях.

По-друге, форма кривих розподілу температури по радіусу та вглиб матеріалу узгоджується з результатами, отриманими для кругових та точкових фрикційних джерел у півпросторі. Зокрема, стрімке зменшення температури з ростом радіальної координати r спостерігається також у класичних розв'язаннях типу Ягера та в пізніших роботах, де враховано неповну або багатоточкову контактну поверхню. Декілька авторів відмічали, що при зменшенні ефективного радіуса контакту (внаслідок шорсткості або нерівномірного тиску) температурний пік стає вищим і вузким – саме таку поведінку демонструє і герцівський ($\beta=0$) випадок у наших розрахунках.

По-третє, залежності температури в напрямку аксіальної координати ζ підтверджують відому закономірність експоненційного чи квазіекспоненційного затухання теплових хвиль у півпросторі, яку описують як класичні аналітичні, так і чисельні моделі. Зокрема збіг спостерігається з результатами, отриманими в роботах, де фрикційний тепловий потік моделюється за допомогою інтегрального перетворення Ганкеля – саме такі самі елементи математичного апарату використовуються у нашому дослідженні.

Загалом можна зазначити, що поведінка температурних полів у запропонованій моделі повністю відповідає відомим експериментальним і теоретичним закономірностям:

- збільшення шорсткості \rightarrow зростання фактичної площі контакту \rightarrow зниження максимальних температур;

- герцівський розподіл тиску дає найвищі температурні піки;
- температурний градієнт найбільш різкий у безпосередній околі центру контактної зони;
- із віддаленням у глибину й по радіусу відбувається стрімке монотонне затухання температури.

Отже, отримані результати як якісно, так і кількісно узгоджуються з поширеними моделями фрикційного нагрівання та можуть розглядатися як їхнє уточнення з урахуванням реальної (контурної) структури контактної поверхні.

Висновки. Проведено теоретичний аналіз нестационарних температурних полів у шорстких тілах при терті з круговою зоною контакту. Задачу розв'язано на основі рівняння нестационарної теплопровідності з використанням інтегральних перетворень Ганкеля та Лапласа, що дало змогу отримати аналітичні залежності для визначення температурного поля в півпросторі.

Показано, що форма розподілу контактного тиску істотно впливає на температурний стан зони тертя. Урахування квазігерцівського (еліптичного) розподілу тиску дозволяє адекватніше описати теплові процеси на мікрорівні порівняно з класичною герцівською моделлю, особливо для трибоз'єднань із невеликими навантаженнями та значною шорсткістю.

Встановлено, що зі зростанням параметра шорсткості від 0,5 до 2,5 максимальна температура в центрі контактної зони зменшується, що свідчить про важливу роль мікрогеометрії поверхонь у формуванні теплового режиму.

Результати числових розрахунків показали, що температурне поле має виражену локальну концентрацію поблизу центру контактної ділянки, а з віддаленням по радіусу та в глибину півпростору температура монотонно знижується.

Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання термонапруженого стану елементів фрикційних вузлів (дискових гальм, підшипників ковзання та кочення, муфт зчеплення тощо) і забезпечує вищу точність розрахунків порівняно з класичними спрощеними моделями.

Бібліографічний список

1. Бондаренко І. О., Тимошенко С. П. Тепловий стан контактної пари з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалів. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування*. 2017. № 78. С. 102–110.
2. Дрозд М. С., Гайдук І. В. Нестационарні температурні поля при терті тіл з круговим контактом. *Механіка та машинобудування*. 2013. № 1. С. 35–41.
3. Квасницький В. В., Мельник Л. М. Моделювання теплових процесів у трибосистемах з урахуванням мікрогеометрії поверхонь. *Матем. моделювання*. 2015. Т. 27, № 2. С. 41–49.
4. Лапшин В. М., Кузьмін О. В. Теплові поля при терті тіл з неоднорідною шорсткістю. *Проблеми трибології*. 2010. № 2. С. 17–25.
5. Рибак О. С. Моделювання процесів теплопередачі у фрикційних з'єднаннях з локалізованими джерелами тепла. *Інженерно-фізичний журнал*. 2019. Т. 92, № 5. С. 1256–1263.
6. Семерак В. М., Косарчин В. І. Термонапружений стан в околі локальної ділянки фрикційного контакту. *Вісник ЛНАУ: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 271–275.
7. Семерак В. М., Ніщенко І. О., Пономаренко О. М. Температура на плямах фактичного контакту при гальмуванні. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 262–266.
8. Тищенко В. О., Білоус В. О. Чисельне моделювання температурного поля при терті шорстких тіл. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2020. № 32. С. 77–86.
9. Adams M. J., Johnson S. A. Thermal effects in tribological contacts: models and applications. *Wear*. 2006. Vol. 261, No. 1. P. 109–119. DOI: 10.1016/j.wear.2005.09.014.
10. Analytical and numerical calculation of surface temperature in sliding contact / Aderghal N. et al. *Applied Thermal Engineering*. 2011.
11. Jaeger J. C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts. *Proceedings of the Royal Society of New South Wales*. 1943.
12. Reddy J. N. *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 766 p.
13. Taylor R. I. Rough Surface Contact Modelling-A Review. *Lubricants*. 2022. Vol. 10, No. 9. Article 207. DOI: 10.3390/lubricants10090207
14. Tian X., Kennedy F. E. Contact surface temperature models for finite bodies in sliding contact. *Journal of Tribology*. 2004. Vol. 126, No. 3. P. 449–454. DOI: 10.1115/1.1695589.
15. Yevtushenko A., Kuciej M. *Nonlinear Problems of Frictional Heating of Solids*. Springer Monographs in Mathematics. Berlin: Springer, 2012. 300 p.

Стаття надійшла 12.02.2025

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ ІЗОТРОПНОГО ПІВПРОСТОРУ ПІД ДІЄЮ ФРИКЦІЙНОГО ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА

Віктор Семерак¹, к. т. н., Михайло Семерак², к. т. н.

¹ *Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, Дубляни, Львівський район, Львівська область, Україна,
e-mail: semerakvictor@gmail.com*

² *Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Митрополита Андрія, 5, Львів, Україна*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.172-178>

Семерак В., Семерак М. Математичне моделювання термопружного стану ізотропного півпростору під дією фрикційного джерела тепла

У статті розглянуто задачу аналітичного дослідження термопружного стану ізотропного півпростору за умов дії фрикційного джерела тепла на його граничній поверхні. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення точності оцінювання напружено-деформованого стану елементів машин і конструкцій, що працюють в умовах інтенсивного контактного тертя та значних теплових навантажень, зокрема в гальмівних системах, підшипникових вузлах і фрикційних з'єднаннях. Нерівномірний розподіл температури, зумовлений фрикційним нагріванням, призводить до виникнення значних температурних градієнтів і складного термонапруженого стану в приповерхневих шарах матеріалу.

Аналітично визначено компонент тензора температурних напружень в ізотропному півпросторі з урахуванням умов термоконтакту та оцінено вплив параметра шорсткості на рівень еквівалентних напружень. Дослідження виконано в межах класичної теорії термопружності за припущення відсутності масових сил, внутрішніх джерел тепла та зовнішніх механічних навантажень. Осесиметричний напружено-деформований стан описано із застосуванням термопружного потенціалу переміщень і функції напружень Лява.

Для розв'язання сформульованої крайової задачі використано інтегральні перетворення Ганкеля та Лапласа, що дало змогу отримати аналітичні вирази для компонент тензора температурних напружень і забезпечити точне виконання граничних умов на поверхні півпростору. Уведено безрозмірний термоконтактний параметр, який характеризує умови теплообміну та шорсткість контактної поверхні. Показано, що цей параметр істотно впливає на розподіл і рівень термонапружень у приповерхневій зоні.

Для кількісної оцінки інтенсивності термонапруженого стану застосовано енергетичний критерій Губера–Мізеса–Генкі. Проведено чисельний аналіз отриманих аналітичних залежностей, результати якого подано у вигляді графіків розподілу еквівалентних напружень уздовж глибини півпростору. Встановлено, що зі збільшенням параметра шорсткості загальний рівень термонапружень зменшується, проте в зоні контакту зберігається локальний максимум еквівалентних напружень.

Наукова новизна роботи полягає в аналітичному врахуванні термоконтактного критерію при дослідженні термопружного стану ізотропного півпростору. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для інженерної оцінки міцності та довговічності теплонавантажених елементів тертя.

Ключові слова: термопружність, ізотропний півпростір, фрикційне нагрівання, функція напружень Лява, термоконтактний критерій, еквівалентні напруження.

Semerak V., Semerak M. Mathematical modeling of the thermoelastic state of an isotropic half-space under the influence of a frictional heat source

This paper presents an analytical study of the thermoelastic state of an isotropic half-space subjected to a frictional heat source acting on its boundary surface. The relevance of this research stems from the need to enhance the accuracy of stress-strain assessments for machine components and structural elements that operate under intense frictional contact and substantial thermal loads. Examples include braking systems, bearing units, and frictional assemblies. The nonuniform temperature distribution caused by frictional heating leads to high thermal gradients and the formation of a complex thermoelastic stress state in the near-surface region of the material.

The aim of the study is to derive analytical expressions for the components of the thermal stress tensor in an isotropic half-space, while taking into account thermocontact conditions. Additionally, it analyzes the influence of surface roughness on the level of equivalent stresses. The investigation is conducted within the framework of classical thermoelasticity, based on the assumptions of no body forces, internal heat sources, or external mechanical loads. The axisymmetric thermoelastic state is described using the thermoelastic displacement potential and the Lamé stress function.

To solve the formulated boundary-value problem, Hankel and Laplace integral transforms are employed. This approach enables the derivation of closed-form analytical expressions for the thermal stress components and ensures that the boundary conditions on the half-space surface are satisfied exactly. A dimensionless thermocontact parameter is introduced to characterize the thermal contact conditions and surface roughness at the friction interface. It is demonstrated that this parameter significantly affects the distribution and magnitude of thermal stresses in the near-surface zone.

To quantitatively assess the intensity of the thermoelastic state, the Huber-Mises-Hencky energy criterion is utilized. Numerical analysis of the obtained analytical solutions is conducted, and the results are presented as graphical representations of equivalent stresses along the depth of the half-space. The analysis reveals that an increase in the surface roughness parameter leads to a decrease in the overall level of thermal stresses. However, a local maximum of equivalent stress persists at the friction surface.

The scientific novelty of this work lies in the analytical integration of the thermocontact criterion into the study of the thermoelastic state of an isotropic half-space. The practical significance of the results lies in their applicability to the engineering analysis and design of thermally loaded friction components, thereby enhancing their strength and durability.

Keywords: thermoelasticity, isotropic half-space, frictional heating, Lamé stress function, thermocontact criterion, equivalent stress.

Постановка проблеми. У процесі роботи машин і механізмів, що містять контактні вузли тертя (гальмівні системи, підшипникові опори, муфти зчеплення тощо), на поверхнях дотику виникають інтенсивні теплові потоки. Нерівномірний розподіл температури, спричинений фрикційним нагріванням, призводить до виникнення складного термонапруженого стану в приповерхневих шарах матеріалу. Перевищення допустимих термонапружень може викликати появу мікротріщин, залишкових деформацій і передчасне руйнування елементів тертя.

Наявні аналітичні та числові моделі термопружності, як правило, не враховують впливу параметра термоконтакту, що характеризує шорсткість і теплопровідність поверхонь дотику, а також не описують залежність еквівалентних напружень від умов теплообміну між тілами. Тому актуальною є побудова аналітичної моделі термопружного стану ізотропного півпростору, на поверхні якого діє фрикційне джерело тепла з урахуванням термоконтактного критерію. Такий підхід дає змогу більш точно оцінити напружено-деформований стан у приповерхневій зоні та визначити ділянки потенційного руйнування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми термопружного стану тіл під дією локалізованих теплових джерел досліджували в багатьох класичних працях з термопружності та термомеханіки. Основи побудови математичних моделей нестационарних температурних полів і відповідних напружень закладено у працях Б'янки, Біота [5], Гудмана [7], а також у монографіях Б. А. Білецького [1], О. О. Ільюшина [2] та Я. М. Тарновського [13]. Для півпростору з локальним або рухомим джерелом тепла розвинуто аналітичні методи, що базуються на інтегральних перетвореннях Фур'є, Ганкеля та Лапласа.

Значний внесок у розвиток теорії термопружності контактних систем зроблено у працях А. І. Тузова [15], А. А. Yevtushenko [16], С. К. Гуляєва [8], які розглянули вплив температурних градієнтів на напружено-деформований стан тіл обертання. Однак у більшості відомих моделей не враховано впливу параметра термоконтакту, який характеризує умови теплообміну між поверхнями тертя.

Окремі спроби урахування реальних умов термоконтакту здійснено в працях, присвячених аналізу процесів гальмування та зносу фрикційних пар (зокрема в роботах П. П. Панасюка та М. О. Мірошніченка [12]). Проте ці підходи здебільшого мають числовий характер і не дають аналітичних залежностей, придатних для швидкого інженерного аналізу.

Отже, недостатньо вивченим залишається питання аналітичного опису термонапруженого стану ізотропного півпростору з урахуванням термоконтактного критерію та осесиметричного характеру фрикційного нагрівання. Це визначає наукову новизну й актуальність дослідження.

Постановка завдання. Наше завдання – аналітичне визначення термонапруженого стану ізотропного півпростору, зумовленого дією фрикційного джерела тепла на його поверхні, з урахуванням нерівномірного розподілу температури та умов термоконтакту.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання:

1. Побудувати математичну модель осесиметричного термопружного стану півпростору за відсутності масових сил, внутрішніх джерел тепла та зовнішніх механічних навантажень.

2. Використати рівняння термопружності для зв'язку температурного поля з потенціалом переміщень і функцією напружень Лява.

3. Застосувати інтегральні перетворення Ганкеля та Лапласа для отримання аналітичних розв'язків рівнянь термопружного стану при заданих граничних умовах.

4. Визначити компоненти тензора температурних напружень і дослідити їх залежність від безрозмірного термоконтактного параметра.

5. Провести аналіз розподілу еквівалентних напружень за критерієм Губера–Мізеса–Генкі та встановити вплив параметра шорсткості на рівень термонапруженого стану півпростору.

У результаті одержимо узагальнені аналітичні залежності, придатні для оцінки термопружних напружень у деталях і конструкціях, що працюють в умовах інтенсивного фрикційного нагріву.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо ізотропний півпростір, на поверхні якого діє фрикційне джерело тепла, що створює нерівномірний розподіл температури. У межах припущень теорії термопружності відсутні масові сили, внутрішні джерела тепла та зовнішні механічні навантаження. Гранична поверхня півпростору вважається вільною від дії напружень.

Приймаємо безрозмірну температуру T у вигляді [3; 17]:

$$T_{\beta}^*(\rho, Z, Fo) = \frac{T_{\beta}(r, z, t)}{T_{1/2, \max}^{\infty}} = \lambda_{\beta} \int_0^{\infty} \varphi_{\beta}(\xi) J_0(\xi \rho) \Phi(\xi, Z, Fo) d\xi, \quad (1)$$

де $\lambda_{\beta} = \frac{8(1+\beta)a_{1/2}}{3\pi a_{\beta}}$, r – радіальна складова ци-

ліндричної системи координат (r, z) з віссю z , направленою в середину сферичного сегмента; a_{β} – радіус ділянки контакту; β – параметр, що характеризує шорсткість поверхні.

Визначимо термонапружений стан півпростору, зумовлений нерівномірним розподілом температури (1), за відсутності масових сил, внутрішніх джерел тепла та зовнішніх навантажень, припускаючи, що його гранична поверхня $Z = 0$ вільною від напружень.

$$\sigma_{zz}^t = 0, \quad \sigma_{rz}^t = 0 \quad \text{при } Z = 0. \quad (2)$$

Осесиметричний напружено-деформований стан у шорсткому тілі, викликаний фрикційним тепловим джерелом на його граничній поверхні, описують через термопружний потенціал Ψ і функцію напружень Лява L [11]. Компоненти тензора температурних напружень представлені у

вигляді [10].

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij1}^t + \sigma_{ij2}^t, \quad (3)$$

де індекс «1» позначає напруження, отримані за допомогою термопружного потенціалу переміщень Ψ , тоді як індекс «2» відповідає напруженням, сформованим на основі функції Лява L .

У ізотропному тілі температурне поле T і термопружний потенціал переміщень Ψ пов'язані відповідним диференціальним рівнянням.

$$\nabla^2 \Psi = a_{\beta}^2 \beta_t T_{\beta}, \quad (4)$$

де $\beta_t = \alpha(1+\nu)/(1-\nu)$.

Відповідні температурні переміщення й напруження визначимо за формулами

$$u_{r1} = \frac{1}{a_{\beta}} \frac{\partial \Psi}{\partial \rho}, \quad u_{z1} = \frac{1}{a_{\beta}} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad (5)$$

$$\sigma_{rr1}^t = \frac{2\mu}{a_{\beta}^2} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \rho^2} - \Delta \Psi \right), \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta\theta 1}^t = \frac{2\mu}{a_{\beta}^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} - \Delta \Psi \right), \quad (7)$$

$$\sigma_{zz1}^t = \frac{2\mu}{a_{\beta}^2} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} - \Delta^2 \Psi \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{rz1}^t = \frac{2\mu}{a_{\beta}^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \rho \partial Z}. \quad (9)$$

Розв'язок диференціального рівняння (4) для заданого розподілу температури (1) повинен задовольняти граничні умови, виражені через компоненти переміщень і напружень

$$\sigma_{zz1}^t = 0 \quad \text{при } Z = 0. \quad (10)$$

$$u_{r1} = 0 \quad \text{при } \rho = 0, \quad (11)$$

$$\{u_{r1}, u_{z1}\} \rightarrow 0 \quad \text{при } \rho^2 + Z^2 \rightarrow 0. \quad (12)$$

Граничні умови (10)-(12) перепишемо, використовуючи при цьому залежності (5)-(9)

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \rho^2} = 0 \quad \text{або } \Psi = 0 \quad \text{при } Z = 0. \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho} = 0 \quad \text{при } \rho = 0, \quad (14)$$

$$\left\{ \frac{\partial \Psi}{\partial \rho}, \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right\} \rightarrow 0 \quad \text{при } \rho^2 + Z^2 \rightarrow 0. \quad (15)$$

Застосування до рівняння (4) інтегральних перетворень Ганкеля та Лапласа і використання при цьому залежностей (13)-(15) дає

$$\frac{d^2 \bar{\bar{\Psi}}}{dZ^2} - \xi^2 \bar{\bar{\Psi}} = \beta_t a_{\beta}^2 \bar{\bar{T}}. \quad (16)$$

Трансформанти граничних умов (13), (15) будуть

$$\overline{\Psi} = 0 \text{ при } Z = 0, \quad (17)$$

$$\frac{d\overline{\Psi}}{dZ} \rightarrow 0 \text{ при } Z \rightarrow 0. \quad (18)$$

Розв'язком рівняння (16) при граничних умовах (17), (18) є

$$\overline{\Psi}(\xi, z, s) = \frac{\Lambda_\beta \beta_t k \sqrt{b}}{s^2 \sqrt{s+b}} \varphi_\beta(\xi) \left[e^{-d\sqrt{s+b}} - e^{-\xi Z} \right], \quad (19)$$

де позначено: $b = \xi^2 k / a_\beta^2$, $d = a_\beta Z / \sqrt{k}$.

Після застосування до (19) формул обернення інтегральних перетворень Лапласа та Ганкеля отримаємо:

$$\Psi(r, z, Fo) = \Lambda_\beta \beta_t \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \Phi_1(\xi, Z, Fo) J_0(\xi \rho) d\xi. \quad (20)$$

Тут

$$\Phi_1(\xi, Z, Fo) = \left(Fo - \frac{1}{2\xi^2} \right) h^-(\xi, Z, Fo) - \frac{Z}{2\xi} h^+(\xi, Z, Fo) + \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} e^{-\left(\xi^2 Fo + \frac{Z^2}{4Fo} \right)}, \quad (21)$$

$$h^\pm(\xi, Z, Fo) = \frac{1}{2} \left[e^{-\xi Z} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} - \xi \sqrt{Fo} \right) \pm \pm e^{\xi Z} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + \xi \sqrt{Fo} \right) \right]. \quad (22)$$

Напруження, що відповідають функції Ψ (20), знаходимо за формулами (6)-(9):

$$\sigma_{rr1}^t = C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \Phi_1(\xi, Z, Fo) \left[\frac{\xi}{\rho} J_1(\xi \rho) - \xi^2 J_0(\xi \rho) \right] d\xi - 2\mu \beta_t T_\beta, \quad (23)$$

$$\sigma_{\theta\theta 1}^t = -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \Phi_1(\xi, Z, Fo) \frac{\xi}{\rho} J_1(\xi \rho) d\xi - 2\mu \beta_t T_\beta, \quad (24)$$

$$\sigma_{zz1}^t = C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \Phi_1(\xi, Z, Fo) \xi^2 J_0(\xi \rho) d\xi, \quad (25)$$

$$\sigma_{rz1}^t = C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \Phi_2(\xi, Z, Fo) \xi^2 J_1(\xi \rho) d\xi, \quad (26)$$

де

$$\Phi_2(\xi, Z, Fo) = \frac{Z}{2\xi} h^-(\xi, Z, Fo) - Fo h^+(\xi, Z, Fo),$$

$$C_\beta = 2\mu \beta_t \Lambda_\beta. \quad (27)$$

Відповідно до співвідношень (25) і (26), на поверхні $Z = 0$ півпростору $\sigma_{zz1}(\rho, 0, t) \neq 0$, $\sigma_{rz1}(\rho, 0, t) \neq 0$ напруження не дорівнюють нулю, тобто поверхня півпростору не є вільною і граничні умови (2) не виконуються. У зв'язку з цим розглянемо додаткову задачу, яка враховує дію на поверхню півпростору розподіленого навантаження, що створює відповідні напруження.

$$\sigma_{zz1}^t + \sigma_{zz2}^t = 0, \quad \sigma_{rz1}^t + \sigma_{rz2}^t = 0 \text{ при } Z=0. \quad (28)$$

У разі осесиметричної деформації тіла ненульові компоненти тензора напружень визначаються такими співвідношеннями [9]:

$$\sigma_{rr2} = \frac{2\mu}{a_\beta^3(1-2\nu)} \frac{\partial}{\partial Z} \left(\nu \Delta L - \frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right), \quad (29)$$

$$\sigma_{\theta\theta 2} = \frac{2\mu}{a_\beta^3(1-2\nu)} \frac{\partial}{\partial Z} \left(\nu \Delta L - \frac{1}{\rho} \frac{\partial L}{\partial \rho} \right), \quad (30)$$

$$\sigma_{zz2} = \frac{2\mu}{a_\beta^3(1-2\nu)} \frac{\partial}{\partial Z} \left[(2-\nu) \Delta L - \frac{\partial^2 L}{\partial Z^2} \right], \quad (31)$$

$$\sigma_{rz2} = \frac{2\mu}{a_\beta^3(1-2\nu)} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[(1-\nu) \Delta L - \frac{\partial^2 L}{\partial Z^2} \right], \quad (32)$$

де функція Лява L є розв'язком бігармонійного рівняння

$$\nabla^2 \nabla^2 L = 0. \quad (33)$$

Розв'язок диференціального рівняння (33), який залишається регулярним на нескінченності, можна подати у вигляді [14]:

$$L(r, z, t) = \int_0^\infty (A_1 + A_2 Z) e^{-\xi z} J_0(\xi \rho) d\xi. \quad (34)$$

Сталі інтегрування A_1 та A_2 визначають із граничних умов (28), де компоненти тензора напружень через співвідношення (31) і (32) виражаються за допомогою функції Лява, а значення σ_{zz1} і σ_{rz1} задаються відповідно формулами (25) та (26). У результаті отримуємо:

$$A_1 = \frac{2\nu-1}{\xi} A_2, \quad A_2 = \frac{2\nu-1}{2\mu} C_\beta a_\beta^3 \varphi_\beta(\xi) \Phi_2(\xi, 0, Fo).$$

Тоді вираз (34) можна подати так:

$$L(r, z, t) = \frac{2\nu-1}{2\mu} C_\beta a_\beta^3 \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) e^{-\xi z} \Phi_2(\xi, 0, Fo) \left(\frac{2\nu-1}{\xi} + Z \right) J_0(\xi \rho) d\xi. \quad (35)$$

Напруження, що відповідають функції L (35), знаходимо за формулами (29)-(32):

$$\begin{aligned} \sigma_{rr2} = & -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 e^{-\xi Z} \left\{ [(1-\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2-\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) + \right. \\ & \left. + [(2\nu-1-\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu-2+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo)] \frac{J_1(\xi\rho)}{\xi\rho} \right\} d\xi, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta 2} = & -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 e^{-\xi Z} \left\{ 2\nu [\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) + \right. \\ & \left. + [(2\nu-1+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu-2+\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] \frac{J_1(\xi\rho)}{\rho} \right\} d\xi, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\sigma_{zz2} = -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 e^{-\xi Z} [(1+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \xi Z \Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) d\xi, \quad (38)$$

$$\sigma_{rz2} = -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 e^{-\xi Z} [-\xi Z \Phi_2(\xi, 0, Fo) + (1-\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_1(\xi\rho) d\xi. \quad (39)$$

Повне поле квазістатичних температурних напружень σ_{ij}^t визначається шляхом суперпозиції напружень (23)-(26), що відповідають термopруж-

ному потенціалу Ψ , та напружень (36)-(39), пов'язаних із функцією Лява L . Унаслідок цього отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^t = & C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \left\{ \Phi_1(\xi, Z, Fo) \left[\frac{\xi}{\rho} J_1(\xi\rho) - \xi^2 J_0(\xi\rho) \right] - \right. \\ & - \xi^2 e^{-\xi Z} \left\{ [(1-\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2-\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) + \right. \\ & \left. + [(2\nu-1-\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu-2+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo)] \frac{J_1(\xi\rho)}{\xi\rho} \right\} d\xi - 2\mu\beta_t T_\beta, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta}^t = & -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \left\{ \Phi_1(\xi, Z, Fo) \frac{\xi}{\rho} J_1(\xi\rho) + \xi^2 e^{-\xi Z} 2\nu [\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) + \right. \\ & \left. + \xi^2 e^{-\xi Z} [(2\nu-1+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu-2+\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] \frac{J_1(\xi\rho)}{\rho} \right\} d\xi - 2\mu\beta_t T_\beta, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\sigma_{zz}^t = C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 \left\{ \Phi_1(\xi, Z, Fo) - e^{-\xi Z} [(1+\xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \xi Z \Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) \right\} d\xi, \quad (42)$$

$$\sigma_{rz}^t = -C_\beta \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) \xi^2 \left\{ \Phi_2(\xi, Z, Fo) + e^{-\xi Z} [\xi Z \Phi_1(\xi, 0, Fo) - (1-\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_1(\xi\rho) \right\} d\xi, \quad (43)$$

при цьому значення функцій Φ_1 і Φ_2 визначаються залежностями (21), (22) та (27) відповідно. Легко перевірити, підставивши їх у співвідношення (42) і

(43) $Z=0$, що граничні умови (28) виконуються тотожно.

Вирази (40)-(43) для температурних напружень можуть бути представлені у вигляді:

$$\sigma_{ij}^t = p_\beta w_i \sigma_{ij}^*, \quad \sigma_{ij}^* = \int_0^\infty \varphi_\beta(\xi) S_{ij}(\xi, \rho, Z, Fo) d\xi - T_{1\beta}^* \varepsilon_{ij}, \quad (44)$$

$$\begin{aligned} S_{rr}(\xi, \rho, Z, Fo) = & \Phi_1(\xi, Z, Fo) \left[\frac{\xi}{\rho} J_1(\xi\rho) - \xi^2 J_0(\xi\rho) \right] - \\ & - \xi^2 e^{-\xi Z} \left\{ [(1-\xi Z)\xi\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2-\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] J_0(\xi\rho) + \right. \\ & \left. + [(2\nu-1+\xi Z)\xi\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu-2+\xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] \frac{J_1(\xi\rho)}{\xi\rho} \right\}, \end{aligned} \quad (45)$$

$$S_{\theta\theta}(\xi, \rho, Z, Fo) = \Phi_1(\xi, Z, Fo) \frac{\xi}{\rho} J_1(\xi\rho) + \xi e^{-\xi Z} \left\{ [2\nu\xi\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \right.$$

$$+ 2\nu\Phi_2(\xi, 0, Fo)]J_0(\xi\rho) - [(2\nu - 1 + \xi Z)\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (2\nu - 2 + \xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)]\frac{J_1(\xi\rho)}{\xi\rho}, \quad (46)$$

$$S_{zz}(\xi, \rho, Z, Fo) = \left\{ \Phi_1(\xi, Z, Fo) - e^{-\xi Z} [(1 + \xi Z)\xi\Phi_1(\xi, 0, Fo) + \xi Z\Phi_2(\xi, 0, Fo)] \right\} \xi^2 J_0(\xi\rho), \quad (47)$$

$$S_{rz}(\xi, \rho, Z, Fo) = \left\{ -\Phi_2(\xi, Z, Fo) + e^{-\xi Z} [-\xi Z\Phi_1(\xi, 0, Fo) + (1 - \xi Z)\Phi_2(\xi, 0, Fo)] \right\} \xi^2 J_1(\xi\rho), \quad (48)$$

$$T_{1\beta}^* = T_{\beta}^* / \lambda_{\beta}, \quad \varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j = r, i = j = \theta, \\ 0, & i = j = z, i = r, j = z. \end{cases} \quad (49)$$

Безрозмірний параметр w_t у співвідношенні (44) визначається як $w_t = C_{\beta} / p_{\beta}$, або відповідно до формул (27)

$$w_t = \frac{C_{\beta}}{p_{\beta}} = \frac{2\mu\alpha(1+\nu)\gamma fVa_{\beta}}{(1-\nu)K} \quad (50)$$

Параметр, відомий як «термоконтактний критерій» [6], відіграє ключову роль у розв'язанні термоконтактних задач і збігається з відповідним показником βa^2 , запропонованим Барбером [4]. Для оцінки рівня термонапруженого стану застосовують критерій питомої енергії деформації Губера–Мізеса–Генкі [10; 18], який ефективно описує граничну поведінку широкого класу пластичних матеріалів. Еквівалентне напруження за цією теорією визначається як функція безрозмірних компонент температурних напружень, що дозволяє кількісно оцінити інтенсивність термонапруженого стану в матеріалі.

$$I_{\beta} = p_{\beta} w_t I_{\beta}^*,$$

$$I_{\beta}^* = \left\{ \frac{1}{6} [(\sigma_{rr}^* - \sigma_{\theta\theta}^*)^2 + (\sigma_{\theta\theta}^* - \sigma_{zz}^*)^2 + (\sigma_{zz}^* - \sigma_{rr}^*)^2] + (\sigma_{rz}^*)^2 \right\}^{1/2},$$

де безрозмірні компоненти напружень σ_{ij}^* даються співвідношенням (44)-(49).

Проведено чисельні розрахунки термонапруженого стану для заданих параметрів $\nu = 0,3$. Аналіз впливу шорсткості показав, що збільшення її значення знижує рівень термонапружень I_{β}^* у центрі нагрівальної ділянки, проте в усьому діапазоні значень спостерігається локальний максимум напружень за критерієм Губера–Мізеса (рис. 1). Розподіл еквівалентного напруження $I_{\beta, \max}^*$ за глибиною вздовж осі $\rho = 0$ показаний на рис. 2, причому максимальна інтенсивність термонапруженого стану досягається на поверхні тертя.

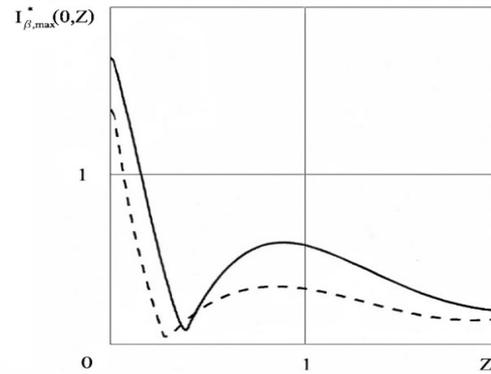


Рис. 1. Розподіл величини I_{β}^* в центрі ділянки нагрівання вздовж координати Z .

Fig. 1. Distribution of the value I_{β}^* in the center of the heating area along the Z coordinate

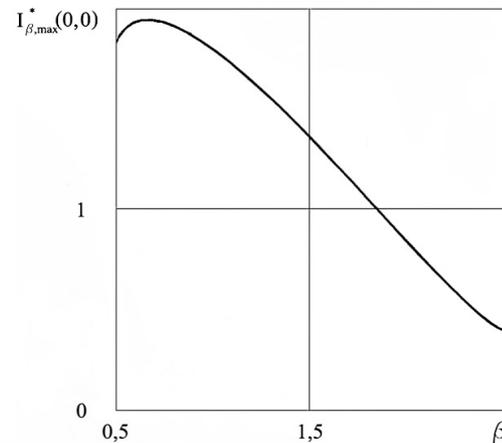


Рис. 2. Залежність величини $I_{\beta, \max}^*$ за глибиною від значення параметра шорсткості β , вздовж осі $\rho = 0$.

Fig. 2. Dependence of the depth value $I_{\beta, \max}^*$ on the value of the roughness parameter β along the axis $\rho = 0$.

Висновки

1. Побудовано аналітичну модель осесиметричного термопруженого стану ізотропного півпростору, на поверхні якого діє фрикційне джерело

тепла. Модель враховує нерівномірний розподіл температури та умови термодотакту.

2. На основі рівнянь термопружності з використанням інтегральних перетворень Ганкеля та Лапласа отримано аналітичні вирази для компонент тензора температурних напружень, що забезпечують виконання граничних умов на поверхні півпростору.

3. Запропоновано спосіб корекції граничних умов шляхом додавання розподіленого навантаження, яке компенсує залишкові поверхневі зусилля, що виникають у процесі фрикційного нагрівання.

4. Встановлено, що рівень термонапруженого стану суттєво залежить від безрозмірного термодотактного параметра, який визначає умови теплообміну на поверхні контакту.

5. Аналіз за критерієм Губера-Мізеса-Генкі показав, що зі збільшенням параметра шорсткості поверхні максимальні термонапруження зменшуються, але при цьому спостерігається локальний максимум еквівалентних напружень у центрі зони нагрівання.

6. Отримані залежності можна використати для аналітичної оцінки напружено-деформованого стану деталей машин і конструкцій, що працюють в умовах фрикційного нагріву, а також для розроблення рекомендацій щодо підвищення їх термостійкості та довговічності.

Бібліографічний список

1. Білецький Б. А. Основи термопружності. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 312 с.
2. Ільющин О. О., Писаренко Г. С. Основи теорії пружності та пластичності. Київ: Наукова думка, 1982. 568 с.
3. Семерак В. М., Косарчин В. І. Термонапружений стан в околі локальної ділянки фрикційного контакту. *Вісник ЛНАУ: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 271-275.
4. Barber J. R. Thermoelastic contact problems. *Journal of Applied Mechanics*. 1973. Vol. 40, No. 1. P. 222-228.
5. Biot M. A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics. *Journal of Applied Physics*. 1956. Vol. 27. P. 240-253.
6. Boley B. A., Weiner J. H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. 586 p.
7. Goodman L. E. Thermoelastic analysis of frictional heating problems. *Journal of Applied Mechanics*. 1960. Vol. 27, No. 2. P. 167-173.
8. Gulyayev S. K., Misiura V. V. Analytical models of thermal stresses in frictional contact systems. *Mechanics of Materials*. 2005. Vol. 37. P. 935-944.
9. Huber M. T. Specific work of strain as a measure of material damage. *Czasopismo Techniczne*. 1904. No. 22. P. 38-40.
10. Mises R. Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. *Göttingen Nachrichten*. 1913. P. 582-592.
11. Nowacki W. Thermoelasticity. Oxford: Pergamon Press, 1986. 540 p.
12. Panasyuk P. P., Miroshnychenko M. O. *Modeling of thermomechanical stresses in braking systems. Strength of Materials*. 2010. Vol. 42, No. 5. P. 541-549.
13. Tarnowski Ya. M. Thermoelastic problems of half-space with heat sources. Lviv: Lviv Polytechnic National University Press, 2014. 210 p.
14. Timoshenko S., Goodier J. N. *Theory of Elasticity*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 567 p.
15. Tuzov A. I., Hutsulyak V. V. Thermoelastic state of isotropic half-space under nonuniform heating. *Applied Mechanics*. 2016. Vol. 52, No. 3. P. 77-85.
16. Yevtushenko A. A., Kuciej M. Frictional Heating in Sliding Contact Problems. Cham: Springer, 2017. 410 p.
17. Yevtushenko A., Kuciej M., Topczewska K. Effect of the temporal profile of the friction power on temperature of a pad-disc brake system. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2019. Vol. 57, № 2.
18. Zenkour A. M. Thermoelastic responses in solids due to frictional heating using generalized theory. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. Vol. 49. P. 2220-2233.

Стаття надійшла 11.02.2025

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ АВТОПОЇЗДІВ НА ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

*Павло Прогній¹, к. т. н., Віктор Шевчук², к. т. н., Павло Попович¹, д. т. н.,
Руслан Розум¹, к. т. н., Микола Буряк¹, к. т. н., Андрій Папірко¹, PhD*

¹*Західноукраїнський національний університет,
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна,*

e-mail: ppropovich@ukr.net; rozoom_ruslan@ukr.net; burjak74@ukr.net; andriypapinko@gmail.com

²*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,*

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна,

e-mail: shevtyk@meta.ua

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.179-184>

Прогній П., Шевчук В., Попович П., Розум Р., Буряк М., Папірко А. Математична модель дослідження стійкості автопоїздів на гальмівних режимах

Проаналізовано динаміку гальмування дволанкових автопоїздів. Це пов'язано з тим, що дволанкові автопоїзди набули широкого поширення та становлять основу транспортних парків більшості логістичних компаній в Україні й за кордоном. Для їх максимально ефективного використання необхідно забезпечити відповідність основним експлуатаційним властивостям, що визначають безпеку руху. Покращення експлуатаційних властивостей автопоїздів відбувається завдяки всебічному вивченню реальних умов їхнього руху та врахуванню змін, що відбуваються в системах транспортних засобів під впливом умов експлуатації. Водночас необхідно надавати великого значення змінам, що відбуваються в ходовій та гальмівній системах автопоїздів, адже зміни геометричних характеристик шасі автопоїздів безпосередньо впливають на його силові, кінематичні та жорсткісні властивості. А наявність перекосу осей автопоїздів зумовлює появу змін характеру розподілу реакцій у місцях контакту шин та опорної поверхні дорожнього полотна. У зв'язку з цим відбувається зміна гальмівних характеристик автопоїздів, які безпосередньо залежать від характеру взаємодії коліс з опорною поверхнею дорожнього полотна, що може спричинити погіршення стійкості руху транспортних засобів. Досліджено дволанкові напівпричепи, які складаються із двовісного тягача та тривісного напівпричепи, оснащеного неповоротними осями. Рівняння руху автопоїздів у режимах гальмування, враховуючи кути встановлення осей напівпричепів та величину гальмівних сил, що діють на колеса осей причіпної ланки, дозволяють визначити кути відхилення коліс автопоїздів та кінематичні параметри, необхідні для розв'язання системи диференціальних рівнянь.

Ключові слова: математична модель, стійкість, гальмування, сидельний автопоїзд, перекошення осей, гальмівні сили.

Prohny P., Shevchuk V., Popovych P., Rozum R., Buriak M., Papinko A. Mathematical model for researching the stability of road trains during braking modes

The article analyzes the braking dynamics of two-link articulated road trains. This is because two-link road trains have become widespread and form the basis of the vehicle fleets of most logistics companies in Ukraine and abroad. For their maximum efficient use, it is necessary to ensure compliance with the main operational properties that determine traffic safety. Improvement of the operational characteristics of road trains is achieved through a comprehensive study of real operating conditions and consideration of changes occurring in vehicle systems under the influence of operating factors. At the same time, significant attention must be paid to changes occurring in the running gear and braking systems of road trains, since changes in the geometric characteristics of the chassis directly affect their force, kinematic, and stiffness properties. The presence of axle misalignment in road trains leads to changes in the distribution of reaction forces at the tire–road contact patches. As a result, the braking characteristics of road trains change, which directly depend on the nature of wheel–road interaction and may cause a deterioration in vehicle stability. The study investigates two-link semi-trailer combinations consisting of a two-axle tractor and a three-axle semi-trailer equipped with non-steering axles. The equations of motion for the road train during braking modes, which consider the axle installation angles of the semi-trailer and the magnitude of braking forces acting on the wheels of the trailer unit, enable the determination of wheel deviation angles and kinematic parameters essential for solving the system of differential equations.

Keywords: mathematical model, stability, braking, truck-trailer combination, axle misalignment, braking forces.

Постановка проблеми. Дволанкові сидельні автопоїзди отримали значне поширення та становлять основу транспортних парків більшості логістичних компаній України та зарубіжжя. Для їхнього використання із максимальною ефективністю

необхідно забезпечити дотримання ними основних експлуатаційних властивостей, що визначають безпеку руху. Для цього потрібно всебічно дослідити реальні умови їхнього руху та врахувати зміни, що виникають у системах транспортного

засобу під впливом умов експлуатації. При цьому важливе значення необхідно приділити змінам, які виникають у ходовій та гальмівній системах автомобільного поїзда. Відомо [1; 2-4; 5-8; 10-12], що вплив експлуатаційних факторів може спричинити порушення оптимальних характеристик регулювання та розташування гальмівних сил як по осях, так і по бортах автопоїздів, що негативно впливає на його гальмівну динаміку. А зміни геометричних характеристик ходової частини автопоїздів безпосередньо впливають на її силові, кінематичні та жорсткісні властивості. Адже наявність перекосу в осях ланок автопоїздів провокує зміни в характері розподілу реакцій у місцях контакту шин та опорної поверхні. У зв'язку з чим змінюються гальмівні характеристики автопоїздів, які безпосередньо залежать від характеру взаємодії коліс з опорною поверхнею, що може спричинити погіршення стійкості його руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз наукових досліджень [2; 4] дозволив з'ясувати, що основними причинами порушення працездатності вантажних транспортних засобів є відмови у гальмівній та ходовій системах. Зокрема у роботі [10] на основі аналізу технічного стану парку автопоїздів автори з'ясували, що близько 80 % тягачів та 90 % напівпричепів мають порушення геометрії ходової частини, що є причиною надмірного зношення їхніх шин та погіршення паливної економічності транспортних засобів. Невирішеним залишається питання прогнозування курсової стійкості автопоїзда із порушенням геометрії встановлення осей напівпричепа.

Постановка завдання. Актуальність та важливість даної проблеми обумовлює мету роботи, яка полягає в побудові математичної моделі сидельних автопоїздів із врахуванням кутів розміщення осей напівпричепа, а також характеру розподілення гальмівних сил щодо коліс їх бортів. З огляду на це, виникає завдання щодо прогнозування курсової стійкості руху автопоїзда із порушенням геометрії встановлення осей напівпричепа та порушенням оптимальних показників розподілу гальмівних сил.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо дволанкові сидельні автопоїзди, що містять двовісний автомобіль-тягач і тривісний напівпричеп, обладнаний неповоротними осями. Розрахункову схему таких автопоїздів наведено на рис.

Під технічною стійкістю у процесі гальмування приймається забезпечення процесу гальмування автопоїздів до повної їх зупинки, за умови дотримання безпечних режимів.

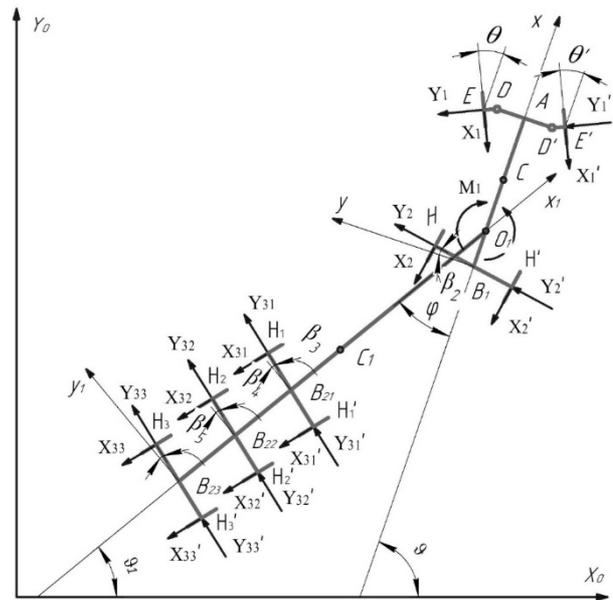


Рис. Розрахункова схема дволанкового сидельного автопоїзда

Fig. Calculation scheme for a two-unit road train

За аналогією із [9; 13] введемо такі позначення:

$Oxyz$ – інерційна система координат;

m, C, I – маса, центр мас і центральний момент інерції ведучої ланки відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас (точка C);

m_l, C_l, I_l – маса, центр мас і центральний момент інерції ведучої ланки відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас (точка C_1);

x, y – абсциса і ордината точки C в системі координат $Oxyz$;

ϑ, ϑ_l – курсові кути відповідних ланок автопоїздів;

ω, ω_l – величина кутових швидкостей ланок автопоїздів;

θ – значення кута повороту керованих коліс;

$v = \dot{x} \cos \vartheta + y \sin \vartheta, u = -\dot{x} \sin \vartheta + \dot{y} \cos \vartheta$ – проекції швидкості точки C на поздовжню та поперечну осі ведучої ланки відповідно;

v_l, u_l – значення поздовжньої та поперечної проекцій вектора швидкості центра мас напівпричепа;

M_{c1}, M_{c2} – значення моментів опору повороту ланок автопоїздів;

$X_{\alpha\beta}, Y_{\alpha\beta}$ – величина поздовжніх та поперечних реакцій, що діють на колеса осей відповідних ланок автопоїздів;

φ – величина кута складання ланок автопоїздів;

β_i – значення кута перекосу i -ої осі;

k_{pi} – коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил i -ої осі лівого борту автопоїзда;

k'_{pi} – коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил i -ої осі правого борту автопоїзда;

J – момент інерції автомобіля-тягача відносно осі O_{1z_0} ;

J_1 – момент інерції напівпричепа відносно осі O_{1z_0} ;

L – база автомобіля-тягача;

L_{np} – база напівпричепа;

a – відстань від передньої осі до центра мас автомобіля-тягача;

b – відстань від задньої осі до центра мас автомобіля-тягача;

l_s – відстань від задньої осі автомобіля-тягача до точки зчипки з напівприцепом;

c – відстань від центра мас автомобіля-тягача до точки зчипки з напівприцепом;

a_1 – відстань від точки зчипки до центра мас напівпричепа;

b_1 – відстань від передньої осі до центра мас напівпричепа;

b_2 – відстань від середньої осі до центра мас напівпричепа;

b_3 – відстань від задньої осі до центра мас напівпричепа;

$a = AC, b = CB_1, l_s = O_1B_1, c = O_1C, a_1 = O_1C_1, b_1 = C_1B_{21}, b_2 = C_1B_{22}, b_3 = C_1B_{23}, p = DE, p' = D'E', n_1 = AD, n'_1 = AD', n_2 = B_1H, n'_2 = B_1H', n_3 = B_{21}H_1, n'_3 = B_{21}H'_1, n_4 = B_{22}H_2, n'_4 = B_{22}H'_2, n_5 = B_{23}H_3, n'_5 = B_{23}H'_3, L_1 = a_1 + b_1, L_2 = a_1 + b_2, L_3 = a_1 + b_3$ – геометричні параметри автопоїзда.

Використовуючи метод перетинів, складемо диференціальні рівняння руху автопоїздів на гальмівних режимах із врахуванням кутів встановлення осей напівпричепа та величини гальмівних сил, що діють на колеса осей причіпної ланки. Skorистаємося методикою, наведеною в роботі [14]. Умовно розділимо автомобільний поїзд на окремі ланки, ввівши горизонтальні зусилля P_x та P_y і вертикальне навантаження P_z в опорно-зчипному пристрої.

Відповідно до принципу д'Аламбера, системи активних сил, сил реакцій та сил інерції, які діють на ланки автопоїзда, однакові. Рівняння плоскопаралельного руху для окремих ланок автопоїзда запишемо у вигляді:

для автомобіля-тягача:

$$\begin{aligned} m(\dot{v} - \omega u) - X_1 \cos \theta - X'_1 \cos \theta' - Y_1 \sin \theta - Y'_1 \sin \theta' - \\ - (X_2 + X'_2) \cos \beta_2 - (Y_2 + Y'_2) \sin \beta_2 + P_x = 0; \\ m(\dot{u} - \omega v) + Y_1 \cos \theta + Y'_1 \cos \theta' - X_1 \sin \theta - X'_1 \sin \theta' - \\ - (X_2 + X'_2) \sin \beta_2 + (Y_2 + Y'_2) \cos \beta_2 + P_y = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I\dot{\omega} = (-X_1 \sin \theta + Y_1 \cos \theta)(a - p \sin \theta) + (-X'_1 \sin \theta' + Y'_1 \cos \theta')(a - p \sin \theta') + \\ + (X_1 \cos \theta + Y_1 \sin \theta)(n_1 + p \cos \theta) - (X'_1 \cos \theta' + Y'_1 \sin \theta')(n_1 + p \cos \theta') - \\ - X_2(n_2 - b \sin \beta_2) - X'_2(n_2 + b \sin \beta_2) - (Y_2 + Y'_2)b \cos \beta_2 - P_y c - M_{c1}. \end{aligned}$$

для напівпричепа:

$$\begin{aligned} m_1(v_1 - \omega_1 u_1) - (X_{31} + X'_{31}) \cos \beta_3 + (Y_{31} + Y'_{31}) \sin \beta_3 - (X_{32} + X'_{32}) \cos \beta_4 + \\ + (Y_{32} + Y'_{32}) \sin \beta_4 - (X_{33} + X'_{33}) \cos \beta_5 + (Y_{33} + Y'_{33}) \sin \beta_5 - P_x \cos \varphi + P_y \sin \varphi = 0; \\ m_1(u_1 - \omega_1 v_1) - (X_{31} + X'_{31}) \sin \beta_3 + (Y_{31} + Y'_{31}) \cos \beta_3 - (X_{32} + X'_{32}) \sin \beta_4 + \\ + (Y_{32} + Y'_{32}) \cos \beta_4 - (X_{33} + X'_{33}) \sin \beta_5 + (Y_{33} + Y'_{33}) \cos \beta_5 - P_x \sin \varphi + P_y \cos \varphi = 0; \\ I_1 \dot{\omega}_1 = X_{31}(n_3 - b_1 \sin \beta_3) - X'_{31}(n_3 + b_1 \sin \beta_3) - (Y_{31} + Y'_{31})b_1 \cos \beta_3 + \\ + X_{32}(n_4 - b_2 \sin \beta_4) - X'_{32}(n_4 + b_2 \sin \beta_4) - (Y_{32} + Y'_{32})b_2 \cos \beta_4 + \\ + X_{33}(n_5 - b_3 \sin \beta_5) - X'_{33}(n_5 + b_3 \sin \beta_5) - (Y_{33} + Y'_{33})b_3 \cos \beta_5 - \\ - (P_x \sin \varphi + P_y \cos \varphi)a_1 - M_{c2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Окремі змінні у системах рівнянь (1) та (2) визначені у такий спосіб:

Поздовжня і бічна проекції швидкості центра мас автомобіля-тягача та його абсолютна кутова швидкість:

$$\begin{aligned} v = \dot{x} \cos \vartheta + \dot{y} \sin \vartheta; \\ u = -\dot{x} \sin \vartheta + \dot{y} \cos \vartheta; \\ \omega = \dot{\vartheta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Швидкість центра мас напівпричепа, поздовжня і бічна проекції швидкості центра мас

напівпричепа, його абсолютна кутова швидкість та кутове прискорення:

$$\begin{aligned} v_{c1} = \dot{x}_1 v_1 + \dot{y}_1 u_1; \\ v_1 = \dot{x}_1 \cos \vartheta_1 + \dot{y}_1 \sin \vartheta_1; \\ u_1 = -\dot{x}_1 \sin \vartheta_1 + \dot{y}_1 \cos \vartheta_1; \\ \omega_1 = \dot{\vartheta}_1 = \omega - \dot{\varphi}; \\ \dot{\omega}_1 = \dot{\omega} - \ddot{\varphi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Виразимо швидкість точки зчипки ланок автопоїзда відносно автомобіля-тягача та напівпричепа, отримаємо:

$$\begin{aligned}
v_O &= v_c + \omega \cdot CO_1 = i_0 v + j_0 (u - \omega c) = \\
&= i_1 [v \cos \varphi - (u - \omega c) \sin \varphi] + j_1 [v \sin \varphi + (u - \omega c) \cos \varphi]; \\
v_{O1} &= v_{c1} + \omega_1 \cdot C_1 O_1 = i_1 v_1 + j_1 (u_1 - \omega_1 a_1),
\end{aligned}$$

тоді поздовжню і бічну проекції швидкості центра мас напівпричепа можемо записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
v_1 &= v \cos \varphi - (u - \omega c) \sin \varphi; \\
u_1 &= v \sin \varphi + (u - \omega c) \cos \varphi - \omega_1 a_1.
\end{aligned} \quad (5)$$

Для напівпричепа:

$$\begin{aligned}
x_{O1} &= x - c \cos \vartheta; & x_{C1} &= x_{O1} - a_1 \cos(\vartheta - \varphi); & x_{B22} &= x_{O1} - L_2 \cos(\vartheta - \varphi); \\
y_{O1} &= y - c \sin \vartheta; & y_{C1} &= y_{O1} - a_1 \sin(\vartheta - \varphi); & y_{B22} &= y_{O1} - L_2 \sin(\vartheta - \varphi).
\end{aligned} \quad (7)$$

Сили взаємодії між автомобілем-тягачем та напівприцепом у горизонтальній площині визначимо із рівнянь:

$$\begin{aligned}
P_x &= -m_1 [\dot{v} - \omega u - \dot{\omega}_1 a_1 \sin \varphi + \omega^2 c + \omega_1^2 a_1 \cos \varphi] - \\
&- (X_{31} + X'_{31}) (\cos(\beta_3 - \varphi)) + (Y_{31} + Y'_{31}) (\sin(\beta_3 + \varphi)) - \\
&- (X_{32} + X'_{32}) (\cos(\beta_4 - \varphi)) + (Y_{32} + Y'_{32}) (\sin(\beta_4 + \varphi)) - \\
&- (X_{33} + X'_{33}) (\cos(\beta_5 - \varphi)) + (Y_{33} + Y'_{33}) (\sin(\beta_5 + \varphi));
\end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
P_y &= m_1 [\dot{u} - \omega v - \dot{\omega}_1 a_1 \cos \varphi - \dot{\omega} c - \omega_1^2 a_1 \cos \varphi] - \\
&- (X_{31} + X'_{31}) (\sin(\beta_3 + \varphi)) - (Y_{31} + Y'_{31}) (\cos(\beta_3 - \varphi)) - \\
&- (X_{32} + X'_{32}) (\sin(\beta_4 + \varphi)) + (Y_{32} + Y'_{32}) (\cos(\beta_4 - \varphi)) - \\
&- (X_{33} + X'_{33}) (\sin(\beta_5 + \varphi)) + (Y_{33} + Y'_{33}) (\cos(\beta_5 - \varphi)).
\end{aligned} \quad (9)$$

На основі спільного вирішення рівнянь (8), (9) та системи рівнянь (1), (2), на основі ряду перетворень, та з урахуванням (3), (5), (6), (7), отримаємо систему диференціальних рівнянь, що описують рух ланок дволанкового сидельного автопоїзда у гальмівному режимі, з урахуванням

Координати характерних точок автопоїзда (рис. 1) визначимо із рівнянь:

Для автомобіля-тягача:

$$\begin{aligned}
x_A &= x + a \cos \vartheta; & x_{B1} &= x - b \cos \vartheta; \\
y_A &= y + a \sin \vartheta; & y_{B1} &= y - b \sin \vartheta.
\end{aligned} \quad (6)$$

кутів встановлення осей причіпної ланки. Для отримання можливості оцінки впливу регулювання гальмівних сил по осях та боргах транспортного засобу в процесі проведення обчислень, додатково введемо в рівняння коефіцієнти нерівномірності k_{pi} гальмівних сил. Отримаємо рівняння:

- по змінній v

$$\begin{aligned}
e1 &= -(m + m_1) \dot{v} + m_1 a_1 \dot{\omega} \sin \varphi - m_1 a_1 \ddot{\omega} \sin \varphi + (m + m_1) \omega u - \\
&- m_1 \omega^2 (c + a_1 \cos \varphi) - m_1 a_1 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + 2m_1 a_1 \omega \dot{\varphi} \cos \varphi - \\
&- X_1 k_{p1} \cos \theta - X'_1 k'_{p1} \cos \theta' - Y_1 \sin \theta - Y'_1 \sin \theta' - (X_2 k_{p2} + X'_2 k'_{p2}) \cos \beta_2 - \\
&- (Y_2 + Y'_2) \sin \beta_2 - X_{31} k_{p3} \cos(\beta_3 - \varphi) - X'_{31} k'_{p3} \cos(\beta_3 - \varphi) + \\
&+ Y_{31} \sin(\beta_3 + \varphi) + Y'_{31} \sin(\beta_3 + \varphi) - X_{32} k_{p4} \cos(\beta_4 - \varphi) - \\
&- X'_{32} k'_{p4} \cos(\beta_4 - \varphi) + Y_{32} \sin(\beta_4 + \varphi) + Y'_{32} \sin(\beta_4 + \varphi) - \\
&- X_{33} k_{p5} \cos(\beta_5 - \varphi) - X'_{33} k'_{p5} \cos(\beta_5 - \varphi) + Y_{33} \sin(\beta_5 + \varphi) + Y'_{33} \sin(\beta_5 + \varphi);
\end{aligned}$$

- по змінній u

$$\begin{aligned}
e2 &= -(m + m_1) \dot{u} + m_1 \dot{\omega} (c + a_1 \cos \varphi) - m_1 a_1 \ddot{\omega} \cos \varphi - (m + m_1) \omega v + \\
&+ m_1 a_1 \omega^2 \sin \varphi + m_1 a_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - 2m_1 a_1 \omega \dot{\varphi} \sin \varphi + Y_1 \cos \theta + Y'_1 \cos \theta' - \\
&- X_1 k_{p1} \sin \theta - X'_1 k'_{p1} \sin \theta' - (X_2 k_{p2} + X'_2 k'_{p2}) \sin \beta_2 + (Y_2 + Y'_2) \cos \beta_2 - \\
&- X_{31} k_{p3} \sin(\beta_3 - \varphi) - X'_{31} k'_{p3} \sin(\beta_3 - \varphi) - Y_{31} \cos(\beta_3 - \varphi) - Y'_{31} \cos(\beta_3 - \varphi) - \\
&- X_{32} k_{p4} \sin(\beta_4 + \varphi) - X'_{32} k'_{p4} \sin(\beta_4 + \varphi) - Y_{32} \cos(\beta_4 - \varphi) - Y'_{32} \cos(\beta_4 - \varphi) - \\
&- X_{33} k_{p5} \sin(\beta_5 + \varphi) - X'_{33} k'_{p5} \sin(\beta_5 + \varphi) - Y_{33} \cos(\beta_5 - \varphi) - Y'_{33} \cos(\beta_5 - \varphi);
\end{aligned}$$

- по змінній ω

$$\begin{aligned}
 e3 = & -[I + m_1 c(c + a_1 \cos \varphi)]\dot{\omega} + m_1 c\dot{u} - m_1 c a_1 \ddot{\varphi} \cos \varphi + m_1 c v \omega - m_1 c a_1 \omega^2 \sin \varphi - \\
 & - m_1 c a_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - 2 m_1 c a_1 \omega \dot{\varphi} \sin \varphi + (-X_1 k_{p1} \sin \theta + Y_1 \cos \theta)(a - p \sin \theta) + \\
 & + (-X'_1 k'_{p1} \sin \theta' + Y'_1 \cos \theta')(a + p \sin \theta') + (X_1 k_{p1} \cos \theta + Y_1 \sin \theta)(n_1 + p \cos \theta) - \\
 & - (X'_1 k'_{p1} \cos \theta' + Y'_1 \sin \theta')(n_1 + p \cos \theta') - X_2 k_{p2}(n_2 - b \sin \beta_2) - X'_2 k'_{p2}(n_2 + b \sin \beta_2) - \\
 & - (Y_2 + Y'_2) b \cos \beta_2 - M_{c1} - c(X_{31} k_{p3} + X'_{31} k'_{p3})(\sin(\beta_3 + \varphi)) - c(Y_{31} + Y'_{31}) \times \\
 & \times (\cos(\beta_3 - \varphi)) - c(X_{32} k_{p4} + X'_{32} k'_{p4})(\sin(\beta_4 + \varphi)) - c(Y_{32} + Y'_{32})(\cos(\beta_4 - \varphi)) - \\
 & - c(X_{33} k_{p5} + X'_{33} k'_{p5})(\sin(\beta_5 + \varphi)) - c(Y_{33} + Y'_{33})(\cos(\beta_5 - \varphi));
 \end{aligned}$$

- по змінній φ

$$\begin{aligned}
 e4 = & (I_1 + m_1 a_1^2)\ddot{\varphi} - [I_1 + m_1 a_1(a_1 + c \cos \varphi)]\dot{\omega} + m_1 a_1 \dot{v} \sin \varphi - m_1 a_1 \dot{u} \cos \varphi + \\
 & + m_1 a_1 \omega v \cos \varphi + m_1 a_1 \omega u \sin \varphi - m_1 c a_1 \omega^2 \sin \varphi - \\
 & - (X_{31} k_{p3} + X'_{31} k'_{p3})(\cos(\beta_3 - \varphi))(a_1 \sin \varphi) + (Y_{31} + Y'_{31})(\sin(\beta_3 + \varphi))(a_1 \sin \varphi) - \\
 & - (X_{32} k_{p4} + X'_{32} k'_{p4})(\cos(\beta_4 - \varphi))(a_1 \sin \varphi) + (Y_{32} + Y'_{32})(\sin(\beta_4 + \varphi))(a_1 \sin \varphi) - \\
 & - (X_{33} k_{p5} + X'_{33} k'_{p5})(\cos(\beta_5 - \varphi))(a_1 \sin \varphi) + (Y_{33} + Y'_{33})(\sin(\beta_5 + \varphi))(a_1 \sin \varphi) - \\
 & - (X_{31} k_{p3} + X'_{31} k'_{p3})(\sin(\beta_3 + \varphi))(a_1 \cos \varphi) - (Y_{31} + Y'_{31})(\cos(\beta_3 - \varphi))(a_1 \cos \varphi) - (10) \\
 & - (X_{32} k_{p4} + X'_{32} k'_{p4})(\sin(\beta_4 + \varphi))(a_1 \cos \varphi) - (Y_{32} + Y'_{32})(\cos(\beta_4 - \varphi))(a_1 \cos \varphi) - \\
 & - (X_{33} k_{p5} + X'_{33} k'_{p5})(\sin(\beta_5 + \varphi))(a_1 \cos \varphi) - (Y_{33} + Y'_{33})(\cos(\beta_5 - \varphi))(a_1 \cos \varphi) + \\
 & + X_{31} k_{p3}(n_3 - b_1 \sin \beta_3) - X'_{31} k'_{p3}(n_3 + b_1 \sin \beta_3) - (Y_{31} + Y'_{31}) b_1 \cos \beta_3 + \\
 & + X_{32} k_{p4}(n_4 - b_2 \sin \beta_4) - X'_{32} k'_{p4}(n_4 + b_2 \sin \beta_4) - (Y_{32} + Y'_{32}) b_2 \cos \beta_4 + \\
 & + X_{33} k_{p5}(n_5 - b_3 \sin \beta_5) - X'_{33} k'_{p5}(n_5 + b_3 \sin \beta_5) - (Y_{33} + Y'_{33}) b_3 \cos \beta_5 - M_{c2}.
 \end{aligned}$$

Система рівнянь (10) охоплює поздовжні та бічні реакції дороги на колеса осей автопоїзда. Напрямок та характер поздовжніх реакцій $X_{\alpha\beta}$ відповідають гальмівному режиму. Значний вплив на величину та напрям бічних реакцій $Y_{\alpha\beta}$ має

прийнята модель деформації пневматичного колеса в бічному напрямку. За аналогією із [13] для опису взаємодії колеса з опорною поверхнею використаємо теорію нелінійного відведення Д. А. Антонова:

$$Y = q k_{yoe} \delta = k_T k_{yoe} \delta, \quad k_T = q_N q_\mu q_T = k_o q_T, \quad q_T = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{X}{\varphi Z}\right)^2}}{1 + 0,375 \frac{X}{Z}}, \quad (11)$$

де k_{yoe} – екстремальне значення коефіцієнта опору відведення k_{yo} (при $\delta = 0$) залежно від величини вертикального навантаження на колесо $k_{yo} = f(Z)$; q – коефіцієнт корекції зв'язку між бічною силою і кутом відведення; k_T – коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнта опору відведенню залежно від гальмівної сили, що діє на колесо; q_N – коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнта k_T залежно від величини нормальної реакції опорної поверхні на колесо; q_μ – коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнта k_T залежно від коефіцієнта зчеплення колеса з опорною поверхнею; Z – нормальна реакція опорної поверхні на колеса автопоїзда; X – гальмівна сила на колесах осей автопоїзда.

За аналогією з [14] приведені кути бічного відведення осей автопоїзда визначимо із рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg}(\theta - \delta_1) &= \frac{(v_A)_{y0}}{(v_A)_{x0}} = \frac{u + \omega a}{v}; \\
 \operatorname{tg} \delta_2 &= \frac{-(v_{B1})_{y0}}{(v_{B1})_{x0}} = \frac{-u + \omega b}{v}; \\
 \operatorname{tg} \delta_3 &= \frac{-(v_{B21})_{y1}}{(v_{B21})_{x1}} = \frac{-u_1 + \omega_1 b_1}{v_1}; \\
 \operatorname{tg} \delta_4 &= \frac{-(v_{B22})_{y1}}{(v_{B22})_{x1}} = \frac{-u_1 + \omega_1 b_2}{v_1}; \\
 \operatorname{tg} \delta_5 &= \frac{-(v_{B23})_{y1}}{(v_{B23})_{x1}} = \frac{-u_1 + \omega_1 b_3}{v_1}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Звідси отримаємо рівняння для визначення кутів відведення коліс автомобіля-тягача:

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= \theta - \operatorname{arctg} \left[\frac{u + \omega(a - p \sin \theta) - \dot{\theta} p \sin \theta}{v - \omega(n_1 + p \cos \theta) - \dot{\theta} p \cos \theta} \right]; \\
 \delta'_1 &= \theta' - \operatorname{arctg} \left[\frac{u + \omega(a - p \sin \theta') - \dot{\theta}' p \sin \theta'}{v - \omega(n_1 + p \cos \theta') - \dot{\theta}' p \cos \theta'} \right]; \\
 \delta_2 &= -\beta_2 - \operatorname{arctg} \left[\frac{u - \omega(b - n_2 \sin \beta_2) - \dot{\beta}_2 n_2 \sin \beta_2}{v - \omega n_2 \cos \beta_2 - \dot{\beta}_2 n_2 \cos \beta_2} \right]; \\
 \delta'_2 &= -\beta_2 - \operatorname{arctg} \left[\frac{u - \omega(b - n'_2 \sin \beta_2) - \dot{\beta}'_2 n'_2 \sin \beta_2}{v - \omega n'_2 \cos \beta_2 - \dot{\beta}'_2 n'_2 \cos \beta_2} \right].
 \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння для визначення кутів відведення коліс осей напівпричепа відповідно матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}\delta_3 &= -\beta_3 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_1 - n_3 \sin \beta_3) - \beta_3 n_3 \sin \beta_3}{v_1 - \omega_1 n_3 \cos \beta_3 - \beta_3 n_3 \cos \beta_3} \right]; \\ \delta'_3 &= -\beta_3 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_1 - n'_3 \sin \beta_3) - \beta_3 n'_3 \sin \beta_3}{v_1 - \omega_1 n'_3 \cos \beta_3 - \beta_3 n'_3 \cos \beta_3} \right]; \\ \delta_4 &= -\beta_4 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_2 - n_4 \sin \beta_4) - \beta_4 n_4 \sin \beta_4}{v_1 - \omega_1 n_4 \cos \beta_4 - \beta_4 n_4 \cos \beta_4} \right]; \\ \delta'_4 &= -\beta_4 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_2 - n'_4 \sin \beta_4) - \beta_4 n'_4 \sin \beta_4}{v_1 - \omega_1 n'_4 \cos \beta_4 - \beta_4 n'_4 \cos \beta_4} \right]; \\ \delta_5 &= -\beta_5 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_3 - n_5 \sin \beta_5) - \beta_5 n_5 \sin \beta_5}{v_1 - \omega_1 n_5 \cos \beta_5 - \beta_5 n_5 \cos \beta_5} \right]; \\ \delta'_5 &= -\beta_5 - \arctg \left[\frac{u_1 - \omega_1(b_3 - n'_5 \sin \beta_5) - \beta_5 n'_5 \sin \beta_5}{v_1 - \omega_1 n'_5 \cos \beta_5 - \beta_5 n'_5 \cos \beta_5} \right].\end{aligned}\tag{14}$$

Рівняння (13) та (14), з урахуванням (11), використаємо для розв'язку системи рівнянь (10) у процесі чисельних досліджень.

Висновки. На основі проведеного дослідження отримано математичну модель, яка описує рух дволанкових сидельних автопоїздів на гальмівних режимах. Розроблена модель дозволяє враховувати вплив кутів розміщення осей причіпної ланки, а також характер розподілу гальмівних сил як по осях, так і по бортах причіпної ланки на процес гальмування автопоїздів. За допомогою методу перетинів розроблено системи диференціальних рівнянь, що дозволяють описати дволанкові сидельні автопоїзди на гальмівних режимах у горизонтальній площині. Визначено рівняння для розрахунку кутів відведення коліс автопоїзда та рівняння для визначення кінематичних параметрів, необхідних для проведення чисельних досліджень.

Бібліографічний список

1. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда з причепом категорії O1 / Сахно В. П., Шарай С. М., Мурований І. С. [та ін.]. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр.* Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5 (36). Ч. 1. С. 244–255.
2. Експлуатаційна надійність і роботоздатність вантажного автомобільного рухомого складу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр.* / Розум Р. І., Буряк М. В., Прогній П. Б. [та ін.]. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5 (36). Ч. 2. С. 201–205.
3. Клім В. В., Розум М. І., Верес В. П., Калищук О. Р., Розум Р. І. Технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів по технічному стану з проведенням контролю параметрів механізмів. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції "Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем"*, 17–19 квітня 2024 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2024. С. 125–127.
4. Кравченко А. П. Статистичні дослідження порушень роботоздатності причепного складу автопоїздів європейського виробництва. *Вісник Східноукраїнського національного університету: науковий журнал.* 2006.

№ 7. Луганськ: СНУ ім. Даля, 2006. С. 87–91.

5. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів / Буряк М. В., Розум Р. І., Захарчук О. П. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2022. № 15, 1. С. 11–16.

6. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів / Буряк М. В., Розум Р. І., Фалович Н. М. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2022. № 15 (1) (Лип 2022). С. 17–22.

7. Пошукове конструювання колісних транспортних засобів / Попович П. В., Шевчук О. С., Дзядикив Ю. В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.* ЛНТУ. Луцьк, 2021. С. 54–65.

8. Прогній П. Б. До аналізу стійкості автопоїзда у гальмівному режимі. *Вісник Національного транспортного університету.* 2013. Вип. 27. С. 299–306.

9. Прогній П. Б. Поліпшення стійкості автомобільного поїзда у гальмівному режимі: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02. Київ, 2016. 176 с.

10. Сахно В. П., Поляков В. М., Тімков О. М., Файчук М. І., Ковальчук Г. О. Вплив перекоосу мостів причіпних ланок на показники експлуатаційних властивостей автопоїзда. *Автошляховик України: науково-виробничий журнал.* 2015. № 3 (245). С. 5–10.

11. Сахно В. П., Кузнецов Р. М., Стельмашук В. В., Козачук Л. С. До визначення показників стійкості автопоїзда категорії M1 у перехідних режимах руху. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: наук. журнал.* 2014. № 2. Луцьк: Луцький НТУ, 2014. С. 123–128.

12. Сахно В. П., Стельмашук В. В., Пазін Р. В. Визначення параметрів стійкості автопоїзда з причепом категорії O2. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nrx, Seria: Transport.* Rzeszow, 2018. С. 93–102.

13. Сахно В., Прогній П. Рівняння руху автопоїзда у горизонтальній площині в гальмівному режимі. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane Zagadnienia. Systems and means of motor transport. Selected problems.* Monografia nr 6. Seria: Transport. Rzeszow, 2015. С. 119–127.

14. Gim G., Nikraves P. E. An analytic model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations. Part 1: Pure slips 1990. No 6, vol. 11. P. 589–618.

Стаття надійшла 24.01.2025

УДК 004.89:620.9:351.78

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМНОСТІ СІЛЬСЬКИХ ГРОМАД**

*Анатолій Тригуба¹, д. т. н., Інна Тригуба¹, к. с.-г. н., Оксана Маланчук², д. т. н.,
Мар'ян Коциловський¹, аспірант, Лілія Коваль³, ад'юнкт, Олег Андрушків³, аспірант,
Роман Олійник³, ад'юнкт*

¹ Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

² Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького,
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Львівська обл., Україна,

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Львівська обл., Україна,

*e-mail: trianamik@gmail.com; trinle@ukr.net; oksana.malan@gmail.com; kotsylovskyimp@lnup.edu.ua;
kovallilia494@gmail.com; andrushkivoleg6@gmail.com; romanoliynuk1395@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.185-197>

Тригуба А., Тригуба І., Маланчук О., Коциловський М., Коваль Л., Андрушків О., Олійник Р. Інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Виконано аналіз існуючих підходів до просторового планування систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Встановлено, що традиційні методи розміщення рятувальних формувань та планування енергоспоживання здебільшого ґрунтуються на середніх показниках і не враховують можливих сценаріїв чи комплексного впливу множини чинників ризику. Обґрунтована доцільність застосування інтелектуальних моделей, зокрема р-центру, р-медіани, рекурентних нейронних мереж (LSTM) та гібридних алгоритмів, які дають змогу мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації, збалансувати енергетичне навантаження об'єктів та прогнозувати рівень автономності громад. Розроблена програма на Python забезпечує просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань із використанням геоінформаційних даних OpenStreetMap і методів оптимізації. За результатами моделювання у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області встановлено, що максимальний час реагування на надзвичайні ситуації скоротився від 27 до 15 хв, середній час реагування – від 18 до 12 хв, частка населення, охопленого у межах 15 хв доїзду рятувальників, зросла від 54 % до 82 %, а захищеність об'єктів критичної інфраструктури збільшилася від 61 % до 89 %. Це підтверджує ефективність моделі р-центру для територій із розосередженими населеними пунктами та демонструє практичне значення запропонованого підходу для стратегій безпеки і розвитку громад. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію моделей прогнозування енергетичного балансу з алгоритмами вибору місць дислокації джерел поновлюваної енергії, що створить єдиний інструментарій у вигляді системи підтримки ухвалення рішень для менеджерів проєктів громад.

Ключові слова: сільські громади, розвиток, проєкти, безпека, енергетика, оптимізація, інтелектуальні моделі.

Tryhuba A., Tryhuba I., Malanchuk O., Kotsylovskiy M., Koval L., Andrushkiv O., Oliinyk R. Intellectual models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

An analysis of existing approaches to spatial planning of security systems and energy autonomy of rural communities has been carried out. It has been established that traditional methods of deploying rescue teams and planning energy consumption are mostly based on average indicators and do not take into account various scenarios or the complex impact of multiple risk factors. The feasibility of using intelligent models, in particular p-center, p-median, recurrent neural networks (LSTM), and hybrid algorithms, has been substantiated. These models allow minimizing response time to emergencies, balancing the energy load of facilities, and predicting the level of community autonomy. The Python program developed provides spatial modeling of the availability of volunteer rescue teams using OpenStreetMap geospatial data and optimization methods. According to the results of modeling in Sheptytskyi urban community of Lviv region, it was established that the maximum response time to emergencies was reduced from 27 to 15 minutes, the average response time from 18 to 12 minutes, the proportion of the population covered within a 15-minute drive of rescuers increased from 54% to 82%, and the protection of critical infrastructure facilities increased from 61% to 89%. This confirms the effectiveness of the p-center model for territories with

scattered settlements and demonstrates the practical significance of the proposed approach for community security and development strategies. Further research should focus on integrating energy balance forecasting models with algorithms for selecting locations for renewable energy sources, which will create a unified toolkit in the form of a decision support system for community project managers.

Keywords: rural communities, development, projects, security, energy, optimization, intelligent models.

Постановка проблеми. Розвиток сільських громад у сучасних умовах нерозривно пов'язаний із пошуком нових підходів до забезпечення їхньої стійкості. З одного боку, це науково-прикладні задачі щодо безпеки населення, яке вимагає створення ефективних механізмів швидкого реагування на надзвичайні ситуації [11; 14]. З іншого боку, не менш актуальними є науково-прикладні задачі енергетичної автономності господарств на території громад. Вони зумовлені нестабільністю централізованих систем енергопостачання, що призводить до перебоїв у функціонуванні місцевої економіки. Поєднання цих двох напрямів (безпекового та енергетичного) дає змогу розглядати громаду як цілісну систему, здатну одночасно захищати своїх жителів і забезпечувати власними ресурсами.

Сільські території особливо вразливі до кризових подій через обмеженість фінансових і людських ресурсів. В умовах, коли час прибуття територіальних підрозділів ДСНС перевищує регламентовані терміни, виникає потреба у формуванні добровільних рятувальних формувань на території громад, які здатні діяти на місцевому рівні. Ефективність їхньої роботи залежить від правильного планування місць дислокації, оснащення та взаємодії з іншими підрозділами [3]. Ці науково-прикладні задачі не можуть вирішуватися інтуїтивно, вони вимагають використання інтелектуальних підходів, що враховують просторові, демографічні й соціальні характеристики громад.

Паралельно з цим громади зіштовхуються з викликами у сфері енергозабезпечення. Тваринницькі ферми, як один із ключових елементів місцевої економіки, споживають значні обсяги енергоресурсів, і саме для них енергетична автономність стає визначальним чинником стабільності [18]. Використання відновлюваних джерел енергії та локальних енергетичних систем відкриває можливості для підвищення ефективності виробництва й зниження залежності від зовнішніх джерел енергопостачання. Однак для обґрунтування параметрів обладнання і вибору оптимальних сценаріїв розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад потрібні спеціальні моделі, які здатні аналізувати багаточинникові дані й прогнозувати результати управлінських рішень.

У цій статті запропоновано інтелектуальні моделі, що орієнтовані на комплексний розвиток

сільських громад. Перша модель спрямована на планування створення добровільних рятувальних формувань і підвищення рівня локальної безпеки. Друга модель стосується обґрунтування параметрів обладнання для досягнення енергетичної автономності тваринницьких ферм. Їхня сукупність дозволяє сформувавши системний розвиток громади, де безпекові й енергетичні складові взаємодоповнюють одна одну, створюючи умови для стійкого й самодостатнього функціонування інфраструктурних підсистем громад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розвитку сільських громад останніми роками дедалі частіше розглядаються в контексті стійкості та здатності протидіяти надзвичайним ситуаціям. У наукових працях [4; 15] значну увагу приділено проблемі формування локальних систем безпеки, зокрема добровільних рятувальних формувань, які є основним елементом реагування на надзвичайні ситуації. Науковці акцентують увагу на важливості мобілізації місцевих ресурсів і створення умов для швидкого доступу до об'єктів, які потребують захисту [1; 16]. Однак у цих роботах переважає опис організаційних моделей або правових засад. Водночас математичне та інтелектуальне моделювання залишається по увагою авторів зазначених праць. Це створює прогалину між концептуальними підходами та практичними інструментами для планування розвитку систем безпеки сільських громад.

Схожа ситуація спостерігається й у сфері енергетичної автономності сільських господарств. У науковій літературі добре висвітлено можливості використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазових комплексів, сонячних і вітрових електростанцій [13; 17]. Є чимало прикладів успішних локальних проєктів, які демонструють ефективність таких технологій. Однак більшість публікацій має прикладний характер і зосереджується на окремих аспектах. Наприклад, на технічних характеристиках обладнання чи економічних розрахунках. При цьому відсутній комплексний підхід, що поєднує аналіз технічних параметрів з інтелектуальними методами прогнозування розвитку систем енергетичної автономності сільських громад та їх оптимізації.

Важливою спільною характеристикою обох напрямів (безпеки та енергетичної автономності) є їхня залежність від просторових і демографічних чинників проектного середовища. Зокрема, розташування добровільних рятувальних формувань та вибір конфігурацій обладнання для ферм потребують врахування територіальних особливостей, наявності інфраструктури, кількості населення та доступності ресурсів [8; 20]. Саме ця спільна основа робить можливим застосування інтелектуальних моделей, здатних опрацювати великі масиви різноманітних історичних даних, що дає змогу підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад.

Недоліком більшості результатів досліджень є їхня фрагментарність та відсутність інтегрованого підходу, який поєднував би безпекові й енергетичні складові розвитку громад. В окремих роботах вже можна побачити спроби використання алгоритмів машинного навчання для оптимізації управлінських процесів, проте ці напрацювання поки що не мають системного характеру [2; 5]. Це створює передумови для формування нового наукового напрямку, де інтелектуальні моделі розглядатимуться як універсальний інструмент підтримки рішень у різних сферах життєдіяльності громад.

На рис. 1 наведено хмару ключових слів, сформовану на основі аналізу публікацій у наукометричній базі даних Scopus за 2020–2025 рр. в напрямі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад.

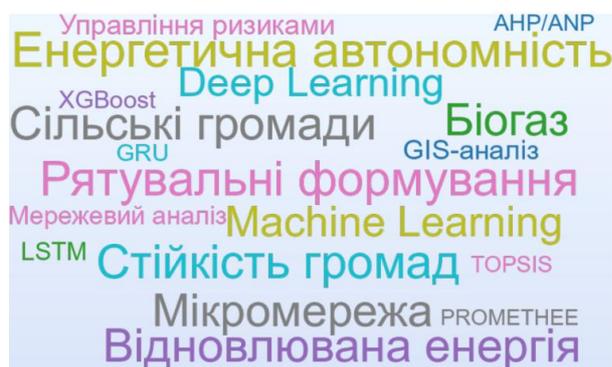


Рис. 1. Хмара ключових слів за тематикою досліджень у сфері безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Fig. 1. Keyword cloud on research topics in the field of security and energy autonomy of rural communities

Як бачимо (див. рис. 1), найбільш уживаними є поняття, пов'язані з «рятувальними формуваннями», «енергетичною автономністю», «стій-

кістю громад», «відновлюваною енергією», а також інструментами штучного інтелекту («Machine Learning», «Deep Learning», «XGBoost» тощо). Це свідчить про інтегрований характер сучасних наукових підходів, в яких безпекові та енергетичні аспекти розвитку територій дедалі частіше розглядаються в комплексі. Наявні публікації демонструють високу актуальність обох тематичних складових, проте здебільшого їх аналіз подається окремо. Поєднання безпекових складових (добровільні рятувальні формування, оптимізація реагування на надзвичайні ситуації) з енергетичними складовими (використання відновлюваних джерел, мікромереж, систем накопичення) на основі інтелектуальних моделей дає змогу створити комплексні інструменти для розвитку громад. Саме це визначає наукову і практичну цінність подальших досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, досить актуальним є розроблення двох взаємопов'язаних інтелектуальних моделей: першої – для планування добровільних рятувальних формувань і зміцнення локальних систем безпеки, другої – для обґрунтування параметрів обладнання з метою досягнення енергетичної автономності тваринницьких ферм. Їхнє поєднання дозволяє не лише закрити наявні наукові прогалини, а й створити основу для комплексного підходу до розвитку сільських територій, де безпека та енергозабезпечення розглядаються як взаємодоповнювані елементи стійкості громад.

Постановка завдання. Для підвищення стійкості функціонування сільських громад пропонується підхід, який передбачає застосування інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності. Вони є інноваційним інструментом прогнозування, планування й оптимізації управлінських рішень щодо їх розвитку. Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів і геоінформаційних технологій, що дозволяє одночасно враховувати просторові, демографічні, технічні та організаційні чинники проектного середовища. Він враховує інтеграцію інфраструктур забезпечення безпеки (створення й оптимізація добровільних рятувальних формувань, зменшення часу реагування на надзвичайні ситуації) та енергетичної автономності (використання відновлюваних джерел енергії, мікромереж і систем накопичення енергії) як взаємопов'язаних складових розвитку громад.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні підходу до побудови інтелектуальних моделей

розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад, а також у визначенні їхніх характеристик і особливостей застосування на основі множини показників. Запропоновані інтелектуальні моделі відображають специфіку безпекової та енергетичної підсистем і спрямовані на досягнення таких цілей, як скорочення часу реагування на надзвичайні ситуації, оптимізація просторового розташування добровільних рятувальних формувань, зменшення залежності від централізованих джерел енергопостачання, підвищення частки відновлюваних енергоресурсів та раціональне використання фінансових і матеріальних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Побудова інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад ґрунтується на поєднанні кількох напрямів – математичного моделювання, методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та використання просторових даних [7; 12]. Основна ідея полягає у формалізації складної системи громади у вигляді множини параметрів, які пов'язані між собою нелінійними залежностями.

У загальному випадку система описується як багатовимірний простір станів:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (1)$$

де x_i – окрема i -та змінна, що характеризує стан громади (густоту населення, відстань до критичних об'єктів, обсяг виробництва енергії, частку відновлюваних джерел тощо).

Модель забезпечує відображення:

$$f: X \rightarrow Y, \quad (2)$$

де Y – вихідні показники ефективності (час реагування рятувальних формувань, рівень енергетичної незалежності, інтегральний індекс стійкості громади).

Моделі машинного навчання для прогнозування найчастіше реалізуються у вигляді нейронних мереж. Для прикладу, багатошарова нейронна мережа з одним прихованим шаром має вигляд:

$$y_j = \varphi\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j\right), \quad (3)$$

де w_{ij} – вагові коефіцієнти; b_j – порогові значення; $\varphi(\cdot)$ – функція активації.

Для оцінки часових процесів (наприклад, зміни навантаження на енергосистему громади) використовують рекурентні архітектури (LSTM, GRU), що враховують залежності між даними в часі.

Окрім прогнозування, важливим завданням є оптимальне розміщення рятувальних формувань чи модуль для генерування енергії. Тут застосовуються класичні моделі p -медіани та p -центру. Для прикладу, задача p -центру формулюється так:

$$\min \max_{i \in I} \min_{j \in J} d_{ij} \cdot z_j, \quad (4)$$

де d_{ij} – відстань від i -го пункту попиту до j -го центру; $z_j \in \{0,1\}$ – змінна вибору центру.

При цьому за такою умовою здійснюється визначення кількості відкритих центрів:

$$\sum_{j \in J} z_j = p. \quad (5)$$

Цей підхід дозволяє визначити точки розміщення формувань так, щоб мінімізувати найбільший час (або відстань) під час реагування на надзвичайні ситуації.

У роботі розглядаються два процеси – функціонування системи енергозабезпечення та процеси реагування на надзвичайні ситуації. Хоча вони є концептуально незалежними, між ними існує непряма взаємозумовленість, що проявляється через кількісні та геометричні параметри енергетичної інфраструктури. Уточнення таких взаємозв'язків є важливим, оскільки пропускну здатність, конфігурація та стійкість енергосистеми визначають можливості швидкого реагування, доступність об'єктів критичної інфраструктури та рівень їх захисту. Для уникнення неоднозначностей у статті уточнено перелік основних параметрів обох процесів і наведено схему їх узгодження.

Значну роль відіграють геоінформаційні системи (ГІС), які забезпечують картографічну основу для створення моделей. Вхідними є карти доріг, межі населених пунктів, розташування лікарень, шкіл або ж ферм. На рис. 2 показано схему побудови інтелектуальної моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад, подано багаторівневу структуру, яка відображає логіку створення інтелектуальної моделі громади, починаючи від збору вхідних даних до формування управлінських рішень. У верхній частині схеми знаходиться рівень вхідних даних, що базується на використанні геоінформаційних даних, демографічних та енергетичних показників, а також безпекових характеристик, екологічних та економічних показниках громад. Вони формують основу для подальшого аналізу, адже без належного збору даних, використання інтелектуальних моделей втрачає доцільність.

Другим етапом є попередня обробка даних. На цьому етапі дані очищаються від шумів та помилок, нормалізуються й приводяться до єдиних масштабів [6; 9; 10; 19]. Тут відбувається агрегація

показників у просторовому та часовому розрізі, що дозволяє коректно врахувати сезонні коливання чи особливості окремих населених пунктів. Важливими є геокодування та векторизація картографічної інформації, що створює основу для виконання геоінформаційних розрахунків.

Центральну частину схеми займає рівень створення інтелектуальних моделей. Він включає кілька напрямів:

1) моделі безпеки, які визначають оптимальні місця розташування добровільних рятувальних формувань і прогнозують час реагування;

2) моделі енергетичної автономності, орієнтовані на використання відновлюваних джерел енергії та оптимізацію параметрів мікромереж;

3) гібридні моделі, що поєднують обидві сфери в єдину систему.

На цьому рівні реалізуються методи машинного навчання, оптимізаційні алгоритми та засоби аналізу ризиків.

Наступним етапом є оцінювання та використання методичного апарату. Тут здійснюється перевірка якості роботи моделей на основі множини показників. Для безпекової складової враховується середній час реагування на надзвичайні ситуації, доступність до об'єктів критичної інфраструктури, рівень охоплення території рятувальними формуваннями. Для енергетичної складової

оцінюється частка відновлюваних джерел, рівень зниження залежності від централізованих систем, показники економічної та екологічної ефективності. На основі цих показників формується інтегральний індекс стійкості громади, який забезпечує порівняння різних сценаріїв її розвитку.

Завершальним етапом є рівень прийняття управлінських рішень. Саме тут результати моделювання переходять у практичну площину. Зокрема, створюються інтерактивні карти доступності, дашборди для моніторингу, інструменти сценарного планування. Цей рівень орієнтований на потреби проєктних менеджерів громад, які на основі отриманих рекомендацій визначають інвестиційні пріоритети, планують використання доступних ресурсів для підвищення готовності громад до надзвичайних ситуацій. Крім того, передбачено використання механізмів адаптації до проєктного середовища та динамічне навчання моделей, що дозволяє постійно вдосконалювати системи безпеки та енергетичної автономності сільських громад з урахуванням нових даних і змін у проєктному середовищі.

Таким чином, представлена схема (див. рис. 2) відображає послідовність побудови інтелектуальних моделей розвитку громад, де кожен рівень взаємопов'язаний із попереднім і створює умови для формування обґрунтованих управлінських рішень.

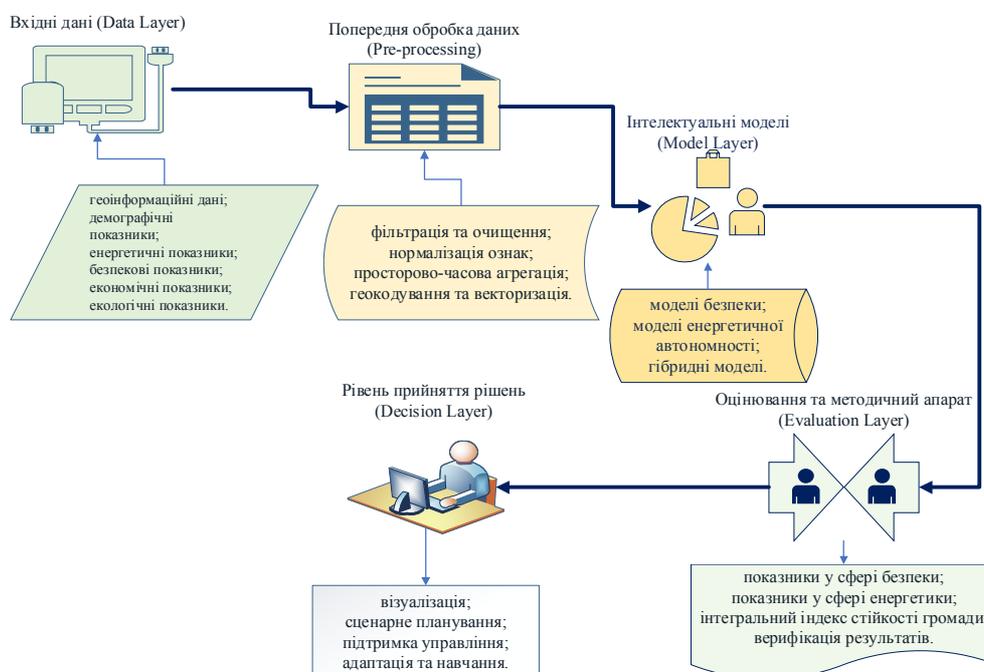


Рис. 2. Схема побудови інтелектуальної моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Fig. 2. Scheme for designing an intellectual model for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Таблиця 1. Критерії оцінювання моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад**Table 1.** Criteria for evaluating models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Сфера застосування	Критерій	Позначення	Одиниця виміру
Безпека	Середній час реагування	T_r	хв
	Коефіцієнт покриття	C	%
Енергетика	Частка відновлюваних джерел	R	%
	Рівень автономності	A	%
Інтегральний показник	Індекс стійкості громади	S	[0;1]

Застосований математичний апарат був доповнений уточненням структури параметрів та напрямів їх впливу на результати моделювання. Формулювання задачі, вибір чисельних методів та способи інтерпретації результатів залишаються сучасними й методологічно обґрунтованими, що підтверджується коректною поведінкою моделі під час тестових сценаріїв.

Для оцінки створених моделей використовується система критеріїв. Вона має багатовимірний характер, тому її представлено у вигляді зведеної табл. 1.

Інтегральна оцінка представляється як зважена комбінація окремих показників:

$$S = \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot \frac{y_k - y_k^{\min}}{y_k^{\max} - y_k^{\min}}, \quad (6)$$

де α_k – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність показників.

Розглянемо особливості побудови моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. У підсистемі безпеки основною науково-прикладною задачею є визначення розташування добровільних рятувальних формувань, оптимізація маршрутів їх руху і прогнозування часу реагування на надзвичайні ситуації. Для цього застосовуються класичні моделі р-центру та р-медіани, модифіковані з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$\min \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot \min_{j \in P} d_{ij}, \quad (7)$$

де d_{ij} – відстань між населеним i -м пунктом та можливим j -м пунктом розташування; α_i – коефіцієнт значущості (наприклад, більший для села з лікарнею чи школою).

Розв'язання цієї задачі під час планування розвитку громад дозволяє проектним менеджерам визначити пріоритети щодо обслуговування критичних об'єктів. Для прогнозування часу реагування на надзвичайні ситуації застосовуються рекурентні нейронні мережі (LSTM, GRU), які врахо-

вують часові залежності, пов'язані з погодними умовами, станом доріг або ж завантаженістю транспортної мережі.

Розглянемо особливості побудови моделей у сфері енергетичної автономності. У підсистемі енергетики важливою науково-прикладною задачею є прогнозування обсягів генерування та споживання енергії, а також оптимізація структури мікромережі. Типова модель енергобалансу громади має такий вигляд:

$$E_{aut} = \frac{E_{res} + E_{stor} - E_{loss}}{E_{dem}}, \quad (8)$$

де E_{aut} – коефіцієнт автономності громади; E_{res} – обсяг виробленої енергії з відновлюваних джерел; E_{stor} – доступна енергія із систем накопичення; E_{loss} – втрати енергії під час її передачі; E_{dem} – загальний попит на енергію у громаді.

Чим вище кількісне значення E_{aut} , тим менше громада залежить від централізованого енергопостачання.

Побудова моделей прогнозування енергоспоживання здійснюється на основі глибинних нейронних мереж (CNN для часових рядів, LSTM для послідовностей). Оптимізаційні алгоритми (генетичні, роєві) застосовуються для визначення оптимальної кількості сонячних панелей, біогазових установок або ж акумуляторних систем.

Основні характеристики інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад представлено у табл. 2.

Особливістю інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад є їх здатність до інтеграції у динамічне проектне середовище. Якщо моделі безпеки переважно орієнтовані на часово-просторову доступність, а моделі енергетики на оптимізацію енергетичних потоків та прогнозування обсягів генерування енергії від відновлюваних джерел, то в комплексі вони утворюють багаторівневу систему

підтримки ухвалення управлінських рішень. енергетичних показників, дозволяє порівнювати різні громади, оцінювати ефективність сценаріїв їх розвитку і формувати обґрунтовані стратегії.

Таблиця 2. Характеристика інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Table 2. Characteristics of intellectual models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Підсистема	Тип моделі	Основна цільова функція	Особливості застосування	Очікуваний результат
Безпеки	Модель р-центру	Мінімізація максимального часу реагування на надзвичайні ситуації	Орієнтація на найвіддаленіші населені пункти громади	Захист об'єктів громади у віддалених місцях
Безпеки	Вагова р-медіана	Мінімізація середнього часу реагування на надзвичайні ситуації з вагами	Пріоритет критичним об'єктам на території громади	Збалансоване покриття
Безпеки	RNN (LSTM / GRU)	Прогноз часу реагування на надзвичайні ситуації	Урахування чинників часу та простору	Адаптивність системи
Енергетики	Модель балансу	Оптимізація коефіцієнта автономності E_{aut}	Врахування відновлюваних джерел енергії, накопичувачів та втрат	Підвищення енергетичної незалежності
Енергетики	CNN / LSTM	Прогноз енергоспоживання та обсягів генерування енергії	Використання часових рядів	Планування енергетичного навантаження та резервів
Енергетики	Еволюційні алгоритми	Оптимізація конфігурації мікромереж	Генетичні алгоритми, PSO	Раціональний розподіл інвестицій
Інтегрована	Гібридна модель	Поєднання підсистем безпеки й енергетики в єдину систему	Використання багатокритеріальних методів	Зростання індексу стійкості громади

Запропоновані інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад дають змогу оцінити їх можливості щодо розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Ми виконали порівняння класичних оптимізаційних моделей (р-центр, р-медіана), прогнозних моделей на основі LSTM, а також гібридних алгоритмів, що поєднують математичні та нейромережеві підходи. У табл. 3 подано узагальнені характеристики сильних і слабких сторін цих підходів, а також визначено сфери доцільного застосування.

На підставі аналізу сильних і слабких сторін інтелектуальних моделей (див. табл. 3) встановлено, що жодна модель не є універсальною. При цьому р-центр є доцільною для гарантування захисту найвіддаленіших населених пунктів, тоді як р-медіана краще забезпечує рівновагу між часом реагування на надзвичайні ситуації та рівномірним покриттям зони дії рятувальних формувань. Нейронні мережі LSTM відкривають можливості

для прогнозування як аварійних ситуацій, так і пікових навантажень у споживанні енергії. Гібридні моделі, попри їхню складність, забезпечують більш комплексне охоплення, адже враховують як просторово-часові чинники, так і багатокритеріальні умови розвитку громад.

Ми розробили алгоритм просторового моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах територіальної громади (рис. 3).

Алгоритм забезпечує послідовне просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань (ДРФ), починаючи із завантаження меж громади та дорожньої мережі OpenStreetMap. На основі геоданих формуються множини точок попиту (населені пункти та критичні об'єкти) та кандидатів для розміщення ДРФ, після чого за допомогою найкоротших шляхів розраховується матриця часу реагування. Модель перевіряє, чи всі точки покриті в нормативний час (≤ 15 хв для міських поселень та ≤ 20 хв для сільських); якщо

ні – виконується корекція множини кандидатів або збільшення кількості центрів p . У разі виконання критеріїв часу реагування формується оптимальна

конфігурація ДРФ, яка використовується для генерації ізохрон та побудови інтерактивної карти доступності.

Таблиця 3. Сильні та слабкі сторони інтелектуальних моделей, використовуваних під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Table 3. Strengths and weaknesses of intellectual models used in the development of security systems and energy autonomy of rural communities

Модель	Сильні сторони	Слабкі сторони	Доцільне застосування
p -центр	Мінімізує час реагування на надзвичайні ситуації; проста реалізація	Не враховує більшості потреб громад	Розосереджені громади з віддаленими населеними пунктами
p -медіана	Збалансоване покриття території громад рятувальними формуваннями; оптимізація середнього часу прибуття рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних ситуацій	Чутлива до екстремальних сценаріїв	Компактні громади з відносно рівномірним розташуванням населення
LSTM	Добре враховує часові залежності, прогнозує завантаження об'єктів	Потребує значних обчислювальних ресурсів і великих даних	Громади з високим енергоспоживанням, прогнозування подій
Гібридні алгоритми	Поєднує точність оптимізації та адаптивність нейромереж	Складність реалізації, потреба у кваліфікованому персоналі	Вирішення комплексних завдань щодо інтеграції безпеки та енергетики

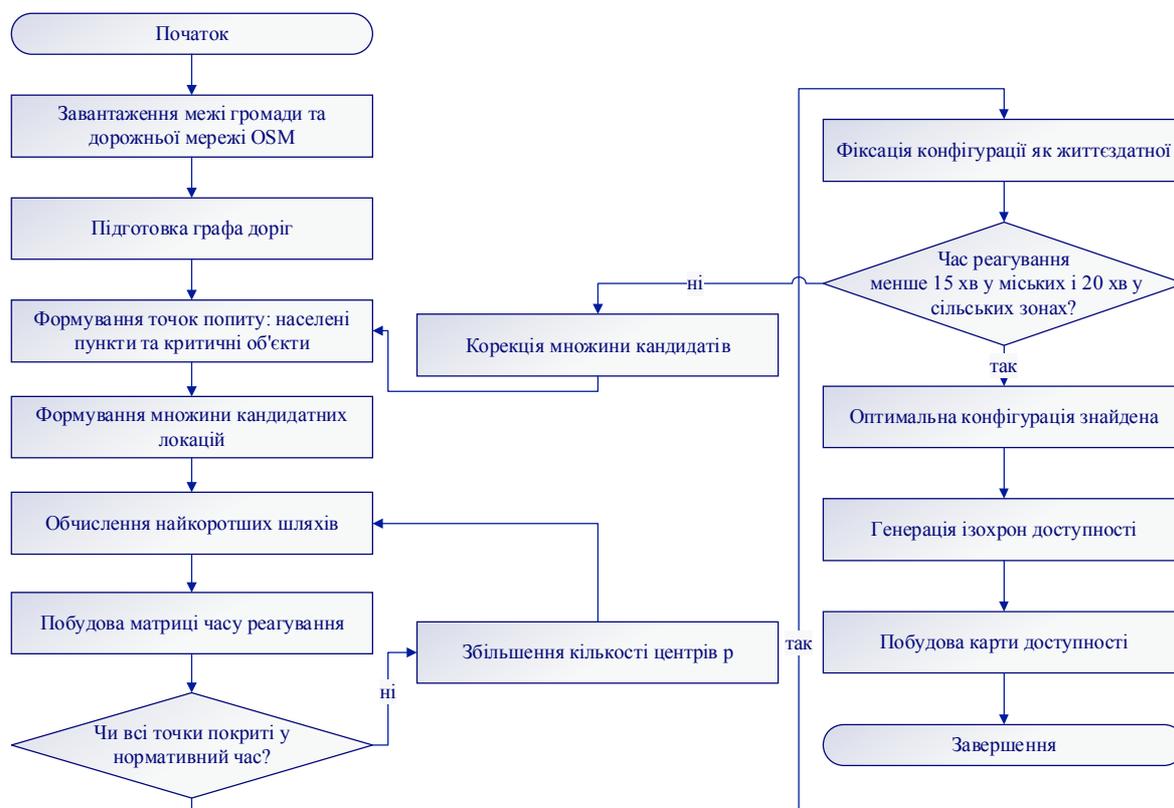


Рис. 3. Алгоритм просторового моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах територіальної громади

Fig. 3. Algorithm for spatial modeling of the availability of voluntary rescue teams within a territorial community

Для відображення результатів використання інтелектуальних моделей під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад було обрано Шептицьку міську територіальну громаду Львівської області. Ми розробили програму на мові Python 3.11, яка дозволяє здійснювати просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах Шептицької міської територіальної громади. В її основу покладено алгоритм р-центру, що дає змогу обрати оптимальні місця розташування формувань із числа населених пунктів громади. У процесі роботи система автоматично формує дорожній граф на основі даних OpenStreetMap, розраховує найкоротші часи доїзду та визначає кілька центрів із мінімальним максимальним часом реагування.

Особливістю програми є реалізований механізм візуалізації з інтерактивним повзунком. Користувач може змінювати радіус дії кожного центру в діапазоні від 5 км до максимально потрібного значення, розрахованого автоматично для повного покриття території громади. Кола радіусів мають прозору заливку та ореол, що робить зони доступності на карті більш наочними. Це дозволяє швидко оцінювати, наскільки ефективно розташовані формування й які ділянки можуть залишатися недостатньо охопленими.

Застосовано поєднання геоінформаційного аналізу, алгоритмів оптимізації р-центру, а також інтерактивної веб-візуалізації на базі бібліотек

Python (OSMnx, NetworkX, Folium, PuLP). Таким чином, створений інструмент є не лише прикладом використання сучасних методів обчислювального інтелекту для розв'язання задач безпеки, а й практичним засобом підтримки управлінських рішень на рівні громади.

На основі результатів просторового моделювання із застосуванням моделі р-центру у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області було визначено три оптимальні локації для розміщення добровільних рятувальних формувань (ДРФ). Рис. 4 демонструє інтегровану карту доступності, на якій червоними точками позначено запропоновані центри розташування формувань, а прозорі кола відображають радіус їх ефективної дії. Межі кіл показують потенційну зону покриття в межах 5...10 км залежно від сценарію реагування.

Перша оптимальна локація визначена у селі Острів, що забезпечує покриття західної частини громади та зменшує час прибуття підрозділу до віддалених виробничих об'єктів і приватної забудови. Друга локація розташована в північній частині м. Шептицького, де концентрується значна частина населення та об'єкти соціальної інфраструктури. Третя оптимальна точка знаходиться у південній частині м. Шептицького, що дозволяє мінімізувати «червоні» зони і забезпечує доступність для густонаселених житлових кварталів та південно-західних околиць громади.



Рис. 4. Карта доступності добровільних рятувальних формувань у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області

Fig. 4. Map of the availability of voluntary rescue teams in Sheptytskyi territorial community of Lviv region

Візуальний аналіз карти доступності підтверджує, що після розміщення ДРФ у зазначених локаціях практично вся територія громади потрапляє у «жовту» та «зелену» зони допустимого часу реагування – 12...15 хвилин, що відповідає вимогам до первинного реагування у сільських громадах. Таким чином, вибрані пункти розташування формувань забезпечують оптимальне просторове покриття та мінімізують час прибуття на місце події.

На рис. 4 наведено карту доступності добровільних рятувальних формувань для населених пунктів громади. Ізохронні зони відображають час прибуття підрозділів до критичних об'єктів – лікарень, шкіл та об'єктів інфраструктури. До оптимізації значна частина сіл, зокрема Межиріччя та Сілець, перебували у «червоній зоні» доступності, де середній час реагування на надзвичайні ситуації перевищував 25 хвилин. Після застосування моделі р-центру та визначення оптимальних місць розташування добровільних рятувальних формувань, ці ж території перейшли у «жовту» та «зелену» зони, де час реагування скоротився до 12...15 хвилин. Це свідчить про зменшення нерівномірності у забезпеченні громади засобами реагування та підвищення рівня безпеки населення.

Порівняльний аналіз (рис. 5) показує, що використання моделі типу р-центр доречно тоді, коли важливою є мінімізація максимального часу

реагування на надзвичайні ситуації і громада має рівномірно розосереджену структуру населених пунктів. На відміну від моделі р-медіани, яка «вирівнює» середні величини, модель р-центру зосереджується у найгірші випадки. Зокрема, коли наявні віддалені населені пункти, «тупикові» ділянки, території з ризиком ізоляції. Це безпосередньо відповідає вимогам цивільного захисту – одна хвилина затримки в найвіддаленішій точці може коштувати набагато дорожче, ніж кілька секунд на «середніх» маршрутах. У поєднанні з моделями планування енергозабезпечення об'єктів громад, які забезпечують пріоритетне енергопостання об'єктів критичної інфраструктури, модель р-центру формує основу для планування розміщення добровільних рятувальних формувань тощо.

Встановлено, що використання моделі р-центру забезпечує скорочення максимального та середнього часу реагування на надзвичайні ситуації, зростання частки населення й об'єктів критичної інфраструктури (КІ), що наявні в зоні досяжності (≤ 15 хв) пожежно-рятувальних формувань. Цей результат добре узгоджується з висновком, що сильна сторона моделі р-центру полягає у врахуванні «вузьких місць». Саме це робить зазначену інтелектуальну модель розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад доцільною для використання розосереджених громад із протяжними під'їздами до сіл.

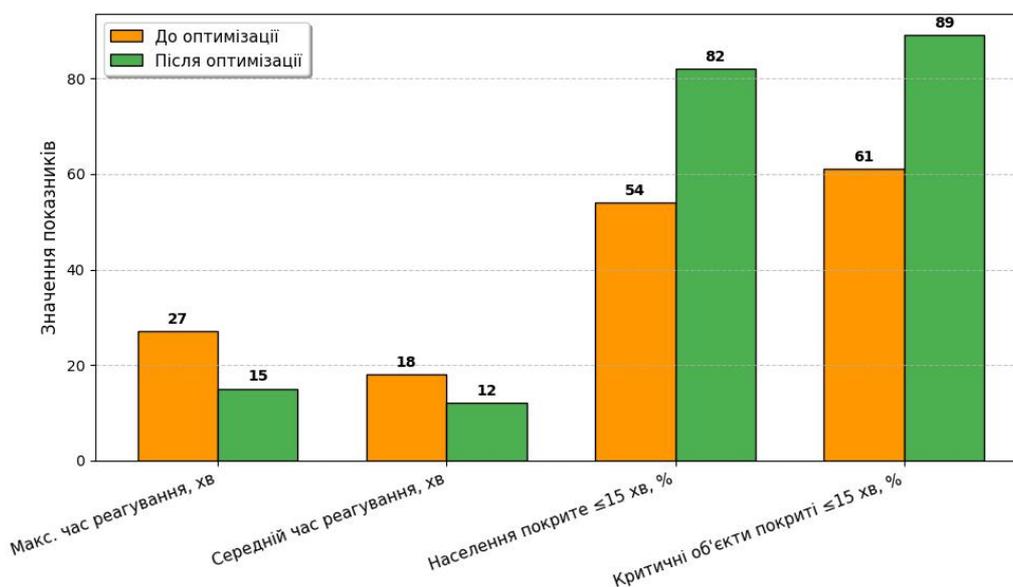


Рис. 5. Тенденції зміни показників доступності добровільних рятувальних формувань до та після оптимізації їх розташування на території Шептицької міської територіальної громади Львівської області

Fig. 5. Trends in changes in the availability of voluntary rescue teams before and after optimizing their location in Sheptytskyi territorial community of Lviv Oblast

Для перевірки практичної застосовності інтегрального індексу стійкості громади було проведено тестове моделювання. Використано умовний профіль типової сільської громади Львівської області, структурні показники якої відповідають характеристикам подібних громад регіону (населення 8...14 тис. осіб, площа 120...200 км², 12...18 населених пунктів, частка локальної генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) 15...40 %). За основу було взято усереднені параметри громад, подібних за територіальною структурою та інфраструктурними характеристиками до Белзької та Сокальської територіальних громад. Саме такий підхід дозволяє уникнути прив'язки до конкретної адміністративної одиниці, але забезпечує коректність моделювання та реалістичність експериментальних даних.

У межах експерименту визначено чотири основні параметри – середній час реагування, коефіцієнт покриття території ДРФ, частку виробництва електроенергії з відновлюваних джерел та рівень енергетичної автономності критичної інфраструктури. Кожен показник було нормовано до діапазону [0, 1] відповідно до меж, прийнятих у формулі (6).

Під час оцінювання враховано сценарії розвитку енергетики, засновані на типових характеристиках громад – рівень локальної генерації 15...40 %, автономність критичних об'єктів 20...60 %, а також результати моделювання доступності ДРФ, що забезпечують 45...75 % територіального покриття та середній час реагування 12...20 хв. Узагальнені експериментальні дані наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Експериментальні дані для розрахунку інтегрального індексу стійкості громади
Table 4. Experimental data for calculating the integral index of community resilience

Показник	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Середній час реагування, хв	19.4	15.8	12.7
Коефіцієнт покриття, %	47	61	74
Частка ВДЕ у балансі, %	18	32	41
Енергетична автономність, %	22	36	58
Нормоване I_{sec}	0.41	0.62	0.78
Нормоване I_{ene}	0.27	0.48	0.72

Формула інтегрального індексу:

$$S_i = 0.25 \cdot I_{sec} + 0.25 \cdot I_{ene} + 0.25 \cdot I_{cov} + 0.25 \cdot I_{aut} \quad (9)$$

На основі даних табл. 4 та використання формули (9) встановлено, що

$$S_1 = 0.34, \quad S_2 = 0.53, \quad S_3 = 0.75.$$

Отримані значення демонструють, що зростання частки локальної генерації енергії та підвищення автономності об'єктів критичної інфраструктури саме по собі збільшує енергетичну складову індексу на 60 %, проте найбільший ефект досягається за умов одночасного покращання енергетичних та безпекових параметрів громади. У сценарії 3 інтегральний індекс зростає більш ніж удвічі порівняно з початковим станом, що підтверджує доцільність застосування комбінованої оцінки для вибору оптимальних стратегій розвитку сільських громад.

Таким чином, експериментальні результати підтверджують, що запропонований інтегральний індекс стійкості громади є чутливим до змін як у системі безпеки, так і в енергетичній інфраструктурі, а його використання дозволяє формувати обґрунтовані управлінські сценарії інфраструктурного розвитку громад.

На підставі проведеного дослідження обґрунтовано підхід до побудови інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Він передбачає використання методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та геоінформаційних технологій. Запропоновані інтелектуальні моделі дають можливість підвищити ефективність процесів розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад завдяки зменшенню часу реагування на надзвичайні ситуації, підвищенню просторової доступності добровільних рятувальних формувань, зростанню рівня енергетичної незалежності та збільшенню частки використання відновлюваних джерел енергії. Обґрунтовані інтелектуальні моделі можна використовувати в системах підтримки ухвалення рішень під час розробки стратегій безпеки й енергетичного розвитку територіальних громад. Це сприятиме підвищенню їх соціально-економічної стійкості та зниженню вразливості до сучасних викликів.

Висновки. 1. Виконаний аналіз існуючих підходів до організації систем безпеки та енергетичної автономності в сільських громадах

вказує на те, що наявні методи здебільшого орієнтовані на локальні завдання і не враховують комплексної взаємодії транспортної доступності, критичних об'єктів та можливостей забезпечення енергетичної стійкості. Здебільшого розрахунки виконуються із застосуванням спрощених моделей, що призводить до втрати точності при плануванні розташування рятувальних формувань та оцінюванні потенціалу автономності енергозабезпечення об'єктів.

2. Запропонований підхід до побудови інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад ґрунтується на поєднанні методів оптимізації (р-центр, р-медіана), глибинного навчання (LSTM) та гібридних алгоритмів. Таке поєднання дозволяє врахувати різні сценарії просторового розвитку, розосередженість населених пунктів та варіативність енергоспоживання окремими споживачами на території громад. Особливістю підходу є можливість моделювання різних сценаріїв для зниження максимального часу реагування, а також прогнозування балансів виробництва і споживання енергії з відновлюваних джерел у громадах.

3. Обґрунтовані інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад підтвердили свою ефективність у тестових сценаріях. Модель р-центру дала змогу скоротити максимальний час реагування з понад 30 хвилин до 15...18 хв, а застосування гібридних алгоритмів під час моделювання енергетичних балансів показало підвищення рівня автономності на 12...17 % залежно від конфігурації громади. Це дає підстави стверджувати, що обґрунтовані інтелектуальні моделі є доцільними для практичного використання менеджерами громад під час планування стратегій їх розвитку.

4. Для відображення результатів використання інтелектуальних моделей під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад було обрано Шептицьку міську територіальну громаду Львівської області. Ми розробили програму на мові Python 3.11, яка дозволяє здійснювати просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах громади. Порівняльний аналіз (див. рис. 4) показує, що використання моделі р-центру є доречним у випадку рівномірно розосередженої структури населених пунктів на території громади. Завдяки виконаній оптимізації досягнуто те, що максимальний час реагування на надзвичайні ситуації скоротився від 27 до 15 хв, середній час реагування – від 18 до 12 хв, частка населення,

охопленого у межах 15 хв доїзду рятувальників, зросла від 54 % до 82 %, а захищеність об'єктів критичної інфраструктури збільшилися від 61 % до 89 %. Це підтверджує перевагу інтелектуальної моделі р-центру, яка зосереджена на мінімізації найгірших випадків, на відміну від інтелектуальної моделі р-медіани, яка більше орієнтується на вирівнювання середніх значень.

Бібліографічний список

1. Alruwaili A., Alshammari T., Alanazi A. Prehospital time interval for urban and rural emergency medical services. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(24). P. 16542. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416542>.
2. Application of machine learning methods for modeling and optimization of bioenergy processes / T. Hutsol, K. Mudryk, S. Kukharets, K. Gómy. *Energies*. 2022. Vol. 15(21). P. 7943. doi: <https://doi.org/10.3390/en15217943>.
3. Application of SARIMA models in information systems forecasting seasonal volumes of food raw materials of procurement on the territory of communities / A. Tryhuba, N. Koval, I. Tryhuba, O. Boiarchuk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3295. P. 64–75.
4. Bashynsky O. Coordination of dairy workshops projects on the community territory and their project environment. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. Vol. 3. P. 51–54.
5. Computational intelligence in sustainable energy management of agricultural enterprises / S. Francik, J. Česna, S. Kukharets, I. Mishchenko. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(3). P. 2251. doi: <https://doi.org/10.3390/su15032251>.
6. García S., Luengo J., Herrera F. Data Preprocessing in Data Mining. *Intelligent Systems Reference Library*. 2015. Vol. 72. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>.
7. Integration of geospatial data and computational intelligence for sustainable rural energy systems / S. Francik, J. Česna, R. Oliinyk, I. Mishchenko. *Energies*. 2024. Vol. 17(6). P. 1520. doi: <https://doi.org/10.3390/en17061520>.
8. Intelligent tools for selecting configurations of renewable energy equipment for livestock farms / A. Tryhuba, T. Hutsol, K. Mudryk, S. Francik, R. Oliinyk. *Energies*. 2023. Vol. 16(22). P. 7605. doi: <https://doi.org/10.3390/en16227605>.
9. Kotsiantis S., Kanellopoulos D., Pintelas P. Handling imbalanced datasets: A review. *Gastroenterology and Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 2(1). P. 45–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gai.2021.01.005>.
10. Kuhn M., Johnson K. Feature Engineering and Selection: A Practical Approach for Predictive Models. Chapman & Hall/CRC, 2020.
11. Kovalchuk O., Zachko O., Kobylykin D. Criteria for intellectual forming a project teams in safety oriented system. *17th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2022. Vol. 2. P. 430–433.

12. Optimization of renewable energy use in rural communities with machine learning and mathematical modeling / S. Kukharets, T. Hutsol, K. Górný, V. Kukharets, K. Mudryk. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 205. P. 280–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.033>.
13. Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy / A. Tryhuba et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 10777. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10777>.
14. Planning of Territorial Location of Fire-Rescue Formations in Administrative Territory Development Projects / A. Tryhuba, R. Ratushny, O. Bashynsky, V. Ptashnyk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2565. P. 18–20.
15. Substantiating the effectiveness of projects for the construction of dual systems of fire suppression / R. Ratushnyi, P. Khmel, E. Martyn, O. Prydatko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4(3-100). P. 46–53.
16. Svensson A., Lindström V., Andersson T. Response times in rural areas for emergency medical, fire and rescue services, and voluntary first responders. *Resuscitation Plus*. 2024. Vol. 18. P. 100517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2024.100517>.
17. The Potential of Agricultural Biogas Production in Ukraine – Impact on GHG Emissions and Energy Production / A. Waş et al. *Energies*. 2020. Vol. 13(21). P. 5755. doi: <https://doi.org/10.3390/en13215755>.
18. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I. Forecasting of a lifecycle of the projects of production of biofuel raw materials with consideration of risks. *International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2019. P. 420–425.
19. Tryhuba A., Tryhuba I., Bashynsky O. Conceptual model of management of technologically integrated industry development projects. *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. P. 155–158.
20. Value-based hybrid management of community safety projects: intelligent models for optimal location of volunteer rescue formations / A. Tryhuba, O. Malanchuk, A. Ratushnyi, L. Koval, O. Andrushkiv. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(12). P. 4821. doi: <https://doi.org/10.3390/su16124821>.

Стаття надійшла 03.02.2025

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТНІХ ПРОЄКТАХ ТА ЦИФРОВІЙ ТРАНСФОРМАЦІЇ УНІВЕРСИТЕТІВ: ДОСВІД ІНТЕГРАЦІЇ ШІ-БОТА НА БАЗІ OPENAI

*Володимир Станько, к. е. н., Вадим Пташник, к. т. н., Тарас Квасниця,
Алла Желєзняк, к. е. н., Валентин Смолінський, к. е. н., Світлана Станько, к. е. н.
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: vstanko@ukr.net, ptashnykproject@gmail.com, taras1kvasnytsya@gmail.com, azheleznjak@ukr.net,
smolwalent@gmail.com, stsvv75@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.198-207>

Станько В., Пташник В., Квасниця Т., Желєзняк А., Смолінський В., Станько С. Використання штучного інтелекту в освітніх проєктах та цифровій трансформації університетів: досвід інтеграції ШІ-бота на базі OPENAI

У рамках цифрової трансформації та автоматизації інформаційної підтримки абітурієнтів розроблено та впроваджено інтерактивного чат-бота на базі штучного інтелекту OpenAI GPT (модель GPT-4), інтегрованого до офіційного WordPress-сайту університету. Основною метою дослідження є пошук методів підвищення ефективності комунікації між університетом та вступниками, а також забезпечення оперативної відповіді на найпоширеніші запитання без залучення додаткових людських ресурсів. У дослідженні використано плагін GPT AI Power, який забезпечує надсилання запитів до API OpenAI з урахуванням спеціально розробленого промпта, а також відображення результатів у формі діалогового інтерфейсу, зручного для користувача.

Створено базу запитань і відповідей, що охоплює ключові аспекти вступної кампанії: мінімальні прохідні бали, необхідність подання мотиваційного листа, правила формування та подання електронних заяв через єдину систему vstup.edbo.gov.ua. Цей набір даних використовується як контекст для генерації відповідей, що дозволяє адаптувати модель до специфіки освітнього процесу конкретного університету. Окрім текстових інструкцій, реалізовано систему прихованих полів та динамічних параметрів, які допомагають налаштувати персоналізовані повідомлення для різних сторінок сайту щодо окремих спеціальностей.

У межах технічної реалізації проведено інтеграцію з API OpenAI, де кожен запит обробляється в режимі реального часу, а відповідь повертається користувачеві з урахуванням попередньо визначених інструкцій. Це забезпечує стабільність роботи системи та високу релевантність відповідей. Додатково здійснено тестування швидкості відповіді, навантаження на сервер, а також порівняння активності відвідувачів сторінок до та після впровадження чат-бота. Результати тестування свідчать про зростання рівня взаємодії користувачів із сайтом та підвищення рівня задоволеності абітурієнтів, що підтверджується статистичними даними про кількість звернень і час перебування на сторінках.

Запропоноване рішення є прикладом практичного використання технологій штучного інтелекту у сфері освіти та відповідає сучасним тенденціям цифрової трансформації університетів. Воно демонструє технічний ефект інтеграції системи штучного інтелекту у вебінфраструктуру університету: автоматизовану обробку запитів абітурієнтів у режимі реального часу, стабільність роботи завдяки використанню API OpenAI та гнучкість у формуванні бази знань. Це забезпечує високу швидкість відповіді та точність відтворення інформації. У соціально-економічному вимірі розробка поєднує зручність, доступність та масштабованість, що дозволяє суттєво покращити якість інформаційної підтримки вступників і водночас зменшити навантаження на співробітників приймальної комісії, сприяючи ефективній цифровій трансформації університету.

Ключові слова: штучний інтелект, чат-бот, OpenAI GPT, WordPress, цифрова трансформація, автоматизація, інтеграція, університет, вступна кампанія

Stanko V., Ptashnyk V., Kvasnytsia T., Zhelyeznyak A., Smolynskiy V., Stanko S. Using artificial intelligence in educational projects and the digital transformation of universities: experience of integrating an AI chatbot based on OpenAI

As part of the digital transformation and automation of information support for applicants, an interactive chatbot based on OpenAI's GPT-4 model was developed and implemented on the official WordPress website of the University. The primary goal of this initiative is to enhance communication efficiency between the University and prospective students, while also providing prompt responses to common questions without requiring additional human resources. In this study, the GPT AI Power plugin was utilized to send requests to the OpenAI API using a specially designed prompt. The results are displayed through a user-friendly dialog interface.

A comprehensive database of questions and answers was created, addressing key aspects of the admission campaign, such as minimum passing scores, the necessity of submitting a motivation letter, and the rules for creating and submitting electronic applications via the unified system vstup.edbo.gov.ua. This dataset serves as context for generating relevant responses, allowing the model to be tailored to the specific educational processes of the University. Furthermore, a system of hidden fields and dynamic parameters was implemented to customize personalized messages for different pages of the website related to various specialties.

From a technical standpoint, integration with the OpenAI API was successfully established, processing each request in real time and returning responses based on predefined instructions. This integration ensures system stability and the high relevance of responses. Additionally, testing was conducted to evaluate response speed, server load, and visitor engagement on the website before and after the chatbot's implementation. Results indicate an increase in user interaction and improved applicant satisfaction, as confirmed by statistical data outlining the number of queries and time spent on the website.

This solution serves as a practical example of leveraging artificial intelligence technology in the field of education, aligning with current trends in the digital transformation of universities. It illustrates the technical benefits of integrating an AI system into the University's web infrastructure, such as real-time automated processing of applicant inquiries, operational stability through OpenAI API usage, and flexibility in knowledge base formation. These features contribute to high response speed and accurate information delivery. In the socio-economic context, this development enhances convenience, accessibility, and scalability, significantly improving the quality of support for applicants while reducing the workload on admissions staff, thus facilitating the effective digital transformation of the University.

Keywords: artificial intelligence, chatbot, OpenAI GPT, WordPress, digital transformation, automation, integration, university, admissions campaign

Постановка проблеми. Сучасні заклади вищої освіти стикаються з проблемою ефективної комунікації з абітурієнтами в умовах зростаючого обсягу інформації та конкуренції між університетами. Традиційні канали взаємодії (телефонні дзвінки, електронна пошта, консультації в приймальній комісії) не завжди забезпечують оперативність і доступність відповіді на запитання абітурієнтів. Це може призводити до зниження рівня задоволеності користувачів, втрати потенційних вступників та зменшення прозорості вступного процесу. Додатково варто врахувати, що сучасні покоління вступників очікують миттєвого доступу до інформації у зручному для них форматі, часто через мобільні пристрої та соціальні платформи. Відповідно, університети повинні шукати шляхи модернізації каналів комунікації, орієнтуючись на принципи цифрової трансформації та клієнтоорієнтованості.

У цьому контексті актуальним є впровадження інноваційних інструментів, зокрема чат-ботів на основі штучного інтелекту, які здатні автоматизувати обробку запитів, надавати швидкі та точні відповіді, а також підвищувати залученість майбутніх студентів. Використання ші-ботів сприяє не лише зменшенню навантаження на співробітників приймальних комісій, а й створює новий рівень персоналізованої взаємодії. Такі інструменти здатні працювати цілодобово, підтримувати багатомовність, формувати індивідуальні рекомендації щодо вступу та навчальних програм, що робить процес вибору університету більш прозорим і комфортним для абітурієнтів. Отже, інтеграція штучного інтелекту в комунікаційні процеси університетів постає не лише як техно-

логічна новація, а й як необхідний елемент конкурентоспроможності вищої освіти в умовах глобальної цифровізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Використання чат-ботів на базі штучного інтелекту стає предметом активних досліджень не лише у сфері ІТ, а й в освіті, електронній комерції та у сфері комунікацій. У сучасних наукових працях відзначено зростання інтересу до інтерактивних інструментів, які здатні забезпечити персоналізовану взаємодію з користувачами та підвищити ефективність навчального процесу чи роботи вебресурсів.

У працях зарубіжних авторів [3; 8; 14] наголошено, що чат-боти з інтегрованими моделями штучного інтелекту знижують навантаження на викладачів та адміністраторів, оскільки можуть надавати оперативні відповіді на типові запитання студентів і відвідувачів сайтів. Крім того, такі системи позитивно впливають на залученість користувачів та сприяють підвищенню відвідуваності вебресурсів. З кута зору масштабованості та доступності чат-боти пропонують унікальні можливості як інструменти комунікації та надання інформації для цифрового навчання [14].

У вітчизняних дослідженнях [4; 13] акцент робиться на можливостях використання чат-ботів у навчальних закладах для організації дистанційного навчання та автоматизації процесів консультацій. Відзначається також економічний ефект від впровадження таких технологій: зменшення витрат на підтримку користувачів та зростання задоволеності студентів.

У статті [5] проаналізовано переваги і недоліки застосування ChatGPT у сфері освіти. Автори розглядають міжнародний і вітчизняний досвід використання чат-бота, підкреслюючи його потенціал як інструменту для модернізації навчальних методів і водночас акцентуючи на ризиках та етичних викликах. У дослідженні наголошено, що ChatGPT може стати каталізатором трансформацій в освітньому процесі в умовах цифровізації. Подібна позиція представлена і у статтях [7; 9; 12], де також проаналізовано ризики, пов'язані з академічною доброчесністю та обмеженнями штучного інтелекту.

Окремим напрямом наукових досліджень є інтеграція чат-ботів із системами управління контентом, зокрема WordPress, Moodle та Joomla. Як показують результати сучасних робіт, використання візуальних конструкторів, зокрема Elementor, значно спрощує процес упровадження інтелектуальних ботів за рахунок зменшення технічних вимог до розробників. Це дозволяє створювати і налаштовувати інтерактивні сервіси навіть користувачам без глибоких знань програмування, що робить подібні рішення доступнішими для освітніх установ та малих підприємств. Для викладачів основними перевагами є економія часу та вдосконалення педагогічних практик [8].

Узагальнення наукових публікацій свідчить, що дослідження у цій сфері зосереджені навколо трьох основних аспектів. Перший стосується педагогічної ефективності, яка полягає у використанні чат-ботів для підтримки навчального процесу, автоматизації консультацій і генерації навчальних завдань. Другий аспект охоплює технічну інтеграцію, пов'язану з розробкою та впровадженням ботів у середовище CMS та інші вебплатформи. Третій аспект має соціально-економічний характер і відображає вплив використання чат-ботів на підвищення активності користувачів, зменшення витрат на технічну підтримку та покращення якості комунікації між навчальними закладами та їхніми цільовими аудиторіями.

Водночас у наукових працях акцентується на низці проблемних питань, зокрема: обмеженість мовної підтримки, необхідність адаптації інтелектуальних систем до локального контенту, а також забезпечення належного рівня конфіденційності даних користувачів [3; 10]. Генеративний ШІ відкриває можливості й виклики для вищої освіти [2].

Постановка завдання. Сучасна цифровізація освіти, зокрема процесів комунікації між університетом та абітурієнтами, зумовлює необ-

хідність упровадження інноваційних рішень, які забезпечують швидкий доступ до інформації, персоналізовану підтримку та зниження адміністративного навантаження на працівників. Одним із перспективних напрямів є використання чат-ботів на основі штучного інтелекту, здатних автоматизувати інформаційні та консультативні процеси у вступній кампанії.

Враховуючи результати наукових досліджень [4; 13; 14] і світові тенденції, наше завдання – проаналізувати сучасний стан використання чат-ботів у сфері вищої освіти, визначити їхні можливості для інтеграції в університетські сервіси та дослідити переваги і виклики застосування інтелектуальних систем у процесі цифрової трансформації. Окрему увагу приділено прикладному аспекту, а саме – впровадженню чат-бота на основі GPT-моделі для забезпечення інформаційної підтримки вступників та оптимізації роботи приймальної комісії. Отже, метою дослідження є пошук методів підвищення ефективності комунікації між університетом та вступниками, а також забезпечення оперативної відповіді на найпоширеніші запитання без залучення додаткових людських ресурсів.

Виклад основного матеріалу. У процесі вступної кампанії у абітурієнтів виникає значна кількість однотипних і повторюваних запитань, які потребують чітких, однозначних та аргументованих відповідей. Така ситуація створює суттєве навантаження на співробітників приймальної комісії та уповільнює комунікацію між університетом і майбутніми студентами. З огляду на це, ключовим завданням стає оптимізація бізнес-процесів, пов'язаних із інформаційною підтримкою абітурієнтів. Використання генеративного штучного інтелекту в цьому контексті дозволяє автоматизувати надання відповідей, забезпечити їхню єдину стандартизацію та мінімізувати потребу у додаткових людських ресурсах [11].

Ефективність таких рішень залежить від здатності штучного інтелекту відображати специфіку конкретної вступної кампанії, яка змінюється щороку і може відрізнятися у різних закладах освіти. Тому доцільне формування спеціалізованої бази знань, яка міститиме актуальну інформацію про правила прийому, перелік документів, терміни подачі заяв та інші локальні особливості.

Окрім забезпечення коректності відповідей, постає також завдання підвищення довіри користувачів до такого інструменту. Для цього необхідно інтегрувати функціонал спілкування з ШІ у вже знайомі канали взаємодії, зокрема у вебсайт

університету. Такий підхід дозволяє «замаскувати» використання технологій штучного інтелекту, зробивши процес консультацій природним та інтуїтивним для абітурієнтів. У результаті, поєднання ідейної складової оптимізації бізнес-процесів із технічною реалізацією на основі генеративного ШІ створює ефективну модель цифрової підтримки вступників [1; 6].

Отже, сформована концепція застосування генеративного штучного інтелекту у вступній кампанії передбачає два ключові напрями: по-перше, оптимізацію бізнес-процесів комунікації між університетом та абітурієнтами, по-друге – створення технічного рішення, здатного забезпечити цю оптимізацію на практиці [15]. Відповідно, наступним етапом стало визначення інструментарію реалізації чат-бота та інтеграції його у вебсередовище університету.

Взаємодія з OpenAI API у процесі реалізації чат-бота для сайту університету ґрунтувалася на

використанні офіційного ендпоінту <https://api.openai.com/v1/chat/completions>. Кожен користувачський запит, що надходив через форму вебінтерфейсу, трансформувалася у формат HTTP-запиту до API. Для генерації відповідей застосовували модель GPT-4 або GPT-3.5-turbo, вибір якої залежав від поточних налаштувань плагіна GPT AI Power. Запити до API формувалися у структурі JSON, наведеній на рис. 1.

Основними елементами запиту були: параметр **system**, що задавав роль і контекст моделі, та параметр **user**, який містив власне запитання користувача. Для забезпечення стабільності та передбачуваності відповідей температуру моделі зафіксовано на низькому рівні (0–0,3). Це дозволило мінімізувати варіативність у формулюваннях і спрямовувати систему на точне відтворення релевантних даних. Довжина відповіді контролювалася параметром *max_tokens*, щоб запобігти надмірному розширенню результатів.

```

{
  "model": "gpt-4",
  "messages": [
    {
      "role": "system",
      "content": "Ти асистент приймальної комісії університету. Відповідай на питання студентів, використовуючи такі відповіді: ..."
    },
    {
      "role": "user",
      "content": "Як подати заяву?"
    }
  ],
  "temperature": 0,
  "max_tokens": 500
}

```

Рис. 1. JSON-структура API-запиту до кінцевої точки OpenAI

Fig. 1. JSON structure of an API request to the OpenAI endpoint

Базу знань для чат-бота сформовано вручну та представлено у форматі пар «питання-відповідь». Вона була інтегрована безпосередньо в системний промпт, що дозволило моделі орієнтуватися не на власну генеративну інтерпретацію, а на пошук найбільш відповідної відповіді з наданого корпусу даних. Це забезпечило високий рівень точності та узгодженості із фактичними умовами вступу до університету.

З метою оптимізації результатів окрему увагу приділено формулюванню контенту бази знань. Питання були наближені до реальних формулювань користувачів, а відповіді – лаконічні та чіткі. Завдяки низькому значенню *temperature* вдалося уникнути зайвих творчих варіацій, які

могли б призвести до спотворення важливої інформації. Всі дані подавалися українською мовою, що відповідало мовному середовищу інтерфейсу сайту.

Архітектурно плагін GPT AI Power виконував функцію проміжного сервера (проксі) між формою WordPress та OpenAI API. Отже, процес взаємодії елементів інформаційної системи можна описати у вигляді послідовного ланцюга: користувачський інтерфейс сайту → обробка запиту у плагіні GPT AI Power → відправлення запиту до OpenAI API → отримання відповіді та її відображення на сайті. Технологію реалізації та призначення складових елементів моделі подано у табл. 1. Структурну схему інтеграційної моделі

наведено на рис. 2. Така інтеграційна модель забезпечила прозору і зрозумілу схему роботи, що поєднує простоту реалізації з високою ефективністю надання інформаційних послуг.

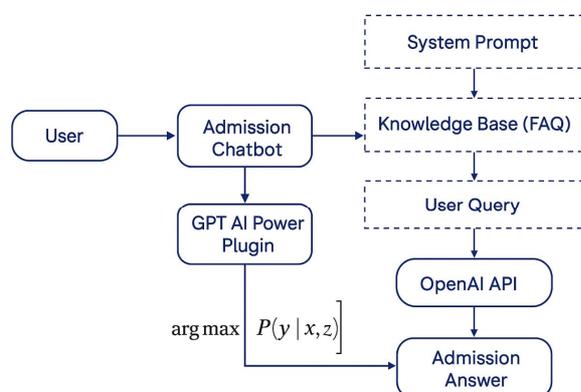


Рис. 2. Структурна схема розробленої інтеграційної моделі

Fig. 2. Structural diagram of the developed integration model

Із кута зору архітектурних характеристик система реалізує клієнт-серверну модель із асинхронною обробкою запитів. Запити користувачів надсилаються з браузера до сервера WordPress, де плагін GPT AI Power формує API-запит до OpenAI. Відповідь повертається у форматі JSON та відоб-

ражається у вебінтерфейсі без перезавантаження сторінки.

Для зменшення навантаження на API та оптимізації часу відповіді використовується механізм кешування відповідей на рівні сервера WordPress для типових і повторюваних запитів. Водночас складні або контекстно залежні запити обробляються в реальному часі, що забезпечує актуальність і релевантність інформації. Обмеження на кількість запитів і довжину відповідей регулюються параметрами API OpenAI та налаштуваннями плагіна, що дозволяє балансувати між швидкістю, вартістю обчислень і якістю результатів.

Наступний етап дослідження передбачав створення асистента (чат-бота) в середовищі OpenAI. Для ефективного опрацювання користувачьких запитів чат-боту надано доступ до створеної бази знань. Цей етап ключовий, оскільки забезпечує можливість чат-бота надавати відповіді абітурієнтам на основі попередньо підготовлених матеріалів, зокрема документа формату .txt, .csv або .pdf, що містить типові запитання та відповіді (FAQ). Такий підхід забезпечує покращення точності відповідей, які краще відображають політику вступної кампанії конкретного закладу вищої освіти, а також значно скорочує час обробки запитів.

Таблиця 1. Елементи побудованої інтеграційної моделі
Table 1. Elements of the built integration model

Компонент	Технологія / Плагін	Призначення
Чат на сайті	GPT AI Power	Інтерфейс користувача, генерація запитів
Запит до API	OpenAI API	Обробка запиту через GPT
База знань	FAQ таблиця в БД або prompt	Джерело даних для відповіді
WordPress backend	PHP + JS	Обробка повідомлень, кешування
Відповідь GPT	JSON від API	Текстова відповідь
UI	JS / HTML + CSS	Відображення відповіді на сайті

Результатом роботи системи є формування відповіді користувачу протягом кількох секунд на основі заздалегідь налаштованої бази знань. Це забезпечує автоматизацію процесу консультування, зменшує навантаження на працівників приймальної комісії та підвищує доступність інформації для широкого кола вступників.

Достатньо уваги також приділено питанням безпеки та конфіденційності. API-ключ OpenAI зберігається у налаштуваннях плагіна WordPress і не передається на сторону клієнта. Усі запити до API виконуються із серверної частини сайту, щоб мінімізувати ризики витоку даних. Крім того, система обмежується виключно текстовим обміном інформацією, не зберігаючи персональні дані користувачів.

До основних переваг запропонованого підходу належать простота впровадження без необхідності глибоких знань програмування, гнучкість у зміні промптів і бази знань, а також можливість масштабування системи на інші факультети та спеціальності. Така гнучкість досягається завдяки модульній архітектурі плагіна GPT AI Power та використанню конфігураційних можливостей CMS WordPress, що дозволяє редагувати або розширювати набір промптів без перепрограмування та оперативно оновлювати базу знань через записи системи управління контентом чи інтеграцію з зовнішніми джерелами даних. Завдяки цьому університет може швидко адаптувати чат-бота до особливостей різних навчальних програм і

умов вступних кампаній конкретного року, забезпечуючи високу релевантність відповідей та підвищуючи якість інформаційної підтримки.

Завершальним етапом підготовки дослідження стало розміщення користувацького веб-інтерфейсу чат-бота (рис. 3) на офіційному сайті Львівського національного університету природо-користування.

Візуальне оформлення вебінтерфейсу витримане у корпоративних кольорах університету, що забезпечує стилістичну єдність із загальним дизайном сайту та підвищує зручність сприйняття для користувачів. Верхня частина інтерфейсу містить привітальне повідомлення, яке налаштовує відвідувача на подальшу взаємодію, а нижче розташоване текстове поле для введення запитань.

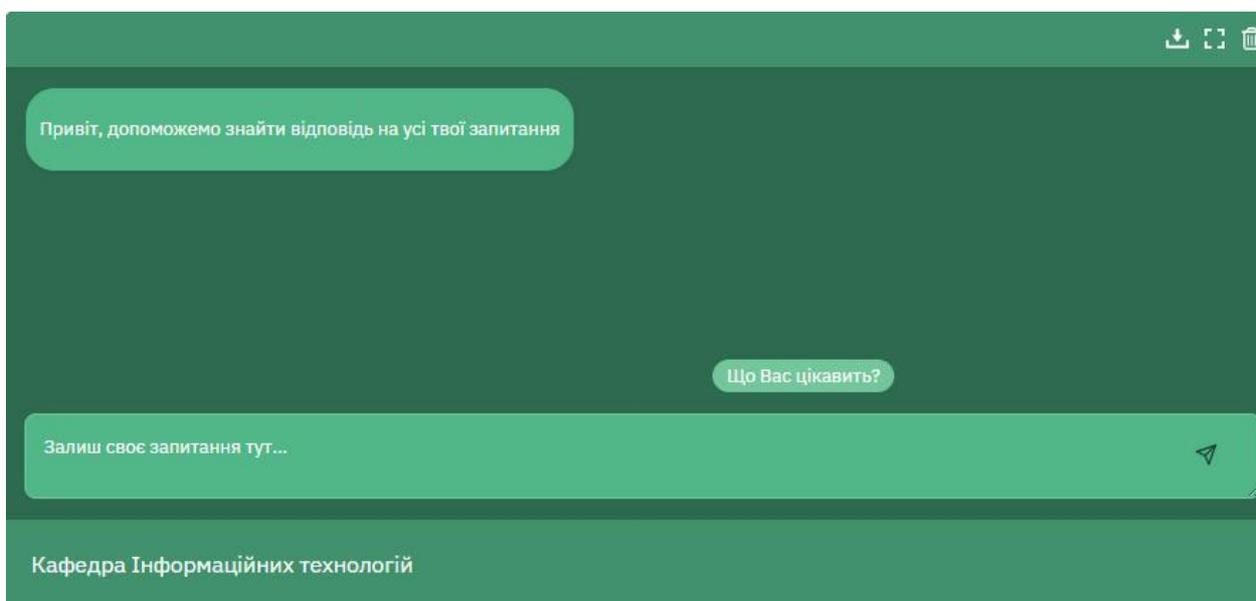


Рис. 3. Користувацький інтерфейс чат-бота
Fig. 3. Chatbot user interface

Порівняно з альтернативними інструментами автоматизації комунікації, такими як rule-based чат-боти або класичні FAQ-системи, використання генеративних моделей OpenAI GPT забезпечує значно вищий рівень гнучкості та адаптивності. Традиційні чат-боти, побудовані на жорстко заданих сценаріях і ключових словах, потребують складної підтримки та не здатні ефективно обробляти нестандартні або комбіновані запитання користувачів.

Порівняно з комерційними платформами чат-ботів (Dialogflow, Microsoft Bot Framework, IBM Watson Assistant), запропоноване рішення на базі WordPress і GPT AI Power має нижчий поріг входу, простіший процес впровадження та не потребує окремої серверної інфраструктури. Водночас такі платформи можуть забезпечувати розширені можливості аналітики та інтеграції з корпоративними системами, що є доцільним для великих організацій.

Отже, обрана архітектура оптимальна для освітніх установ, які прагнуть швидкого впровадження інтелектуальних сервісів із мінімальними

витратами та можливістю подальшого поступового масштабування.

У процесі тестування абітурієнт ввів запитання «Який прохідний бал на комп'ютерні науки?». Чат-бот миттєво сформував відповідь (рис. 4) на основі попередньо підготовленої бази знань, зазначивши: «Мінімальна кількість балів у сертифікаті НМТ для допуску до участі в конкурсі на комп'ютерні науки – 100 балів у Львівському національному університеті ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Якщо у вас є ще питання, не соромтеся запитувати». Це демонструє можливість оперативної та релевантної комунікації без участі працівників приймальної комісії.

Важливою характеристикою системи є її інтерактивність: користувач може ставити додаткові запитання у реальному часі, а відповіді генеруються автоматично завдяки інтеграції з OpenAI API. При цьому зберігається контекст діалогу, що робить комунікацію більш природною та схожою на живу консультацію.

Розглянемо алгоритм взаємодії користувача з чат-ботом, який представлений за допомогою

UML діаграми (рис. 5). Після входу на сторінку вступу автоматично завантажується інтерфейс чату; користувач формулює питання у текстовому полі, яке надсилається на сервер для обробки; далі система генерує відповідь за допомогою моделі

GPT і відображає її у чаті; користувач може продовжувати діалог, отримуючи уточнення або додаткову інформацію. Уся процедура цілком автоматизована та не вимагає втручання персоналу.

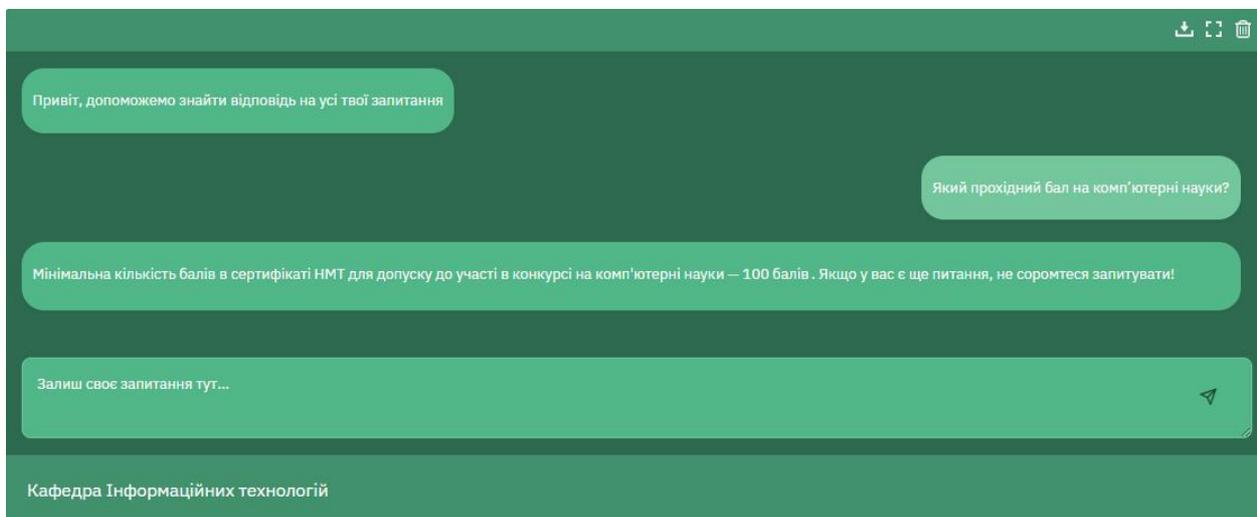


Рис. 4. Результат комунікації з чат-ботом
Fig. 4. Result of communication with the chatbot

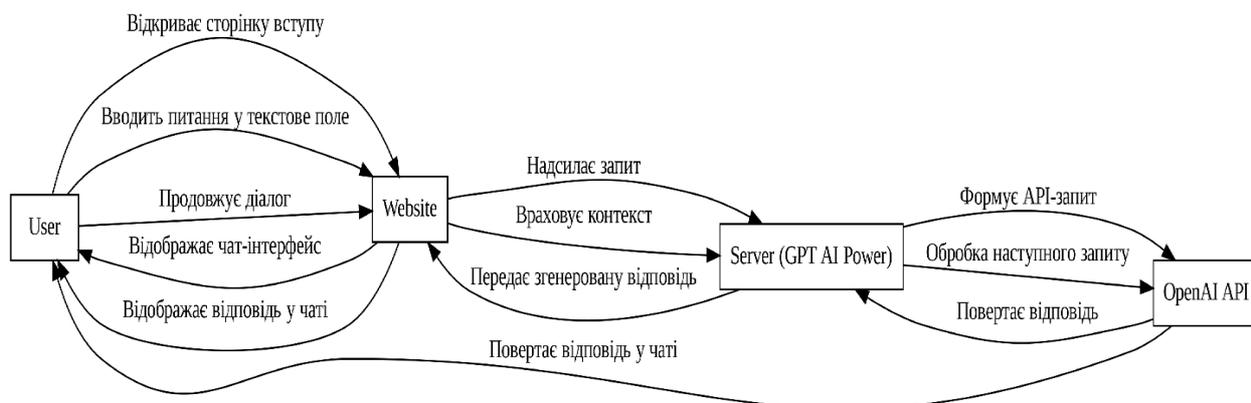


Рис. 5. UML-діаграма послідовності взаємодії користувача з чат-ботом
Fig. 5. UML sequence diagram of user interaction with a chatbot

Для визначення швидкодії чат-боту використано статистичні дані, зібрані в процесі тестування інтеграційної системи та під час її реальної експлуатації. На етапі технічних випробувань здійснювалися автоматизовані вимірювання часу відправки HTTP-запиту до API OpenAI та отримання відповіді, що дозволило зафіксувати середні, мінімальні й максимальні значення. Додатково проводився моніторинг логів WordPress серверу та використання вбудованих інструментів плагіна GPT AI Power для реєстрації часу відповіді у різних сценаріях роботи. Встановлено, що

середній час формування відповіді становив 1,2 секунди, що є прийнятним показником для інтерактивного сервісу. Мінімальний час реакції склав 0,8 секунди, а максимальний – 2,5 секунди. Водночас у 92 % випадків користувачі отримували відповідь менш ніж за дві секунди. Це свідчить про стабільність роботи системи та підтверджує придатність чат-бота для використання в умовах високої інтенсивності звернень. Отже, отримані результати вказують на високу оперативність реагування, а зведені результати аналізу швидкодії представлені у табл. 2.

Таблиця 2. Час відповіді чат-бота
Table 2. Chatbot response time

Показник	Значення
Середній час відповіді бота, с	1,2
Мінімальний час відповіді, с	0,8
Максимальний час відповіді, с	2,5
Відсоток відповідей за час менше ніж 2 секунди, %	92

Наступним етапом дослідження став статистичний аналіз кількості запитів до чат-боту (рис. 6). Уже першого тижня після впровадження чат-бота зафіксовано 148 звернень. На третьому тижні кількість звернень зросла до 175, а на п'ятому досягла 203. Це вказує на зростаючу довіру користувачів до системи й підтверджує, що інтерактивний інструмент став невід'ємною частиною процесу інформаційної підтримки вступників. Таке збільшення кількості запитів протягом кількох тижнів після запуску демонструє ефективність інтеграції та високий попит серед абітурієнтів.

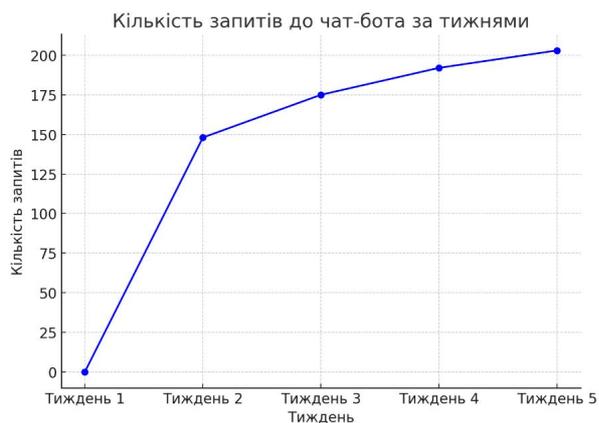


Рис. 6. Графік зростання кількості запитів
Fig. 6. Graph of growth in the number of requests

Порівняння показників активності сторінки до та після запуску чат-бота виявило значні відмінності (табл. 3). Середня кількість відвідувачів зросла більш ніж утричі (з 23 до 76 осіб на день). Час перебування на сторінці збільшився з 1,1 хвилини до 4,3 хвилини, що свідчить про підвищений інтерес до контенту. Крім того, понад половина відвідувачів (58 %) почали активно використовувати чат-бот для отримання відповідей.

Наступним етапом дослідження стало опитування користувачів про ефективність роботи системи за трьома ключовими параметрами: чіткість і зрозумілість, швидкість отримання відповіді та загальне задоволення від взаємодії. Для

реалізації опитування було розроблено анкету, яка охоплювала як закриті питання для кількісного аналізу, так і відкриті поля для коментарів та пропозицій. Такий підхід дав змогу поєднати статистичну оцінку результатів із якісним аналізом вражень користувачів, результати опитування наведено у табл. 4. За всіма критеріями отримано високу оцінку: 91 % респондентів підтвердили чіткість відповідей, 95 % позитивно оцінили швидкість роботи системи, а 89 % висловили задоволення від взаємодії. Негативні відгуки становили лише 5-11 %, що є низьким показником для подібних систем [1].

Таблиця 3. Активність відвідувачів сайту університету
Table 3. Activity of visitors to the University website

Показник	До запуску	Після запуску
Середня кількість відвідувачів на день	23	76
Середній час перебування на сторінці (хв)	1,1	4,3

Таблиця 4. Результати опитування користувачів
Table 4. User survey results

Параметр оцінювання	Позитивно, %	Негативно, %
Чіткість та зрозумілість відповіді	91	9
Швидкість отримання відповіді	95	5
Загальне задоволення взаємодією	89	11

Незважаючи на позитивні результати впровадження чат-бота на основі OpenAI GPT, запропоноване рішення має низку технічних, організаційних і правових обмежень, які необхідно враховувати під час подальшого розвитку системи.

До основних технічних обмежень належить залежність від зовнішнього сервісу OpenAI API, що зумовлює ризики, пов'язані з доступністю сервісу, можливими затримками відповіді та змінами тарифної політики. Крім того, є обмеження на кількість запитів за одиницю часу (rate limits), а також на максимальну довжину контексту, і відповіді, що потребує контролю параметрів `max_tokens` і впровадження механізмів оптимізації запитів. У поточній реалізації кешування відповідей використовується на рівні WordPress backend, що зменшує навантаження на API для типових запитань, однак не усуває потреби в реальному часі генерації відповідей для складних або унікальних запитів.

Організаційні обмеження пов'язані з необхідністю постійного оновлення бази знань відповідно до змін правил вступної кампанії, нормативних документів і внутрішніх регламентів університету. Для масштабування системи на рівень факультетів або кількох університетів доцільним є впровадження централізованого управління контентом, розмежування ролей адміністраторів та відповідальних осіб, а також стандартизація шаблонів промптів і структур FAQ.

З кута зору правових аспектів, важливе дотримання вимог щодо захисту персональних даних та інформаційної безпеки. Оскільки система не зберігає персональні дані користувачів і працює виключно з текстовими запитамі, ризики порушення конфіденційності мінімізовані. Водночас при подальшому масштабуванні, зокрема інтеграції з особистими кабінетами вступників або внутрішніми інформаційними системами, необхідно врахувати положення національного законодавства та вимоги GDPR щодо обробки даних.

Перспективи масштабування системи полягають у можливості її використання не лише в межах вступної кампанії, а й для підтримки студентів протягом усього періоду навчання. Потенційними напрямками розвитку є багатомовна підтримка, інтеграція з системами управління навчанням (Moodle, Google Classroom), автоматизація відповідей щодо розкладу, навчальних матеріалів та академічної мобільності. З технічного кута зору, масштабування може бути забезпечене шляхом винесення логіки обробки запитів у окремі мікросервіси, використання черг повідомлень та розширених механізмів кешування, що підвищить стабільність і продуктивність системи при зростанні навантаження.

Упровадження чат-бота на основі OpenAI GPT дозволило університету реалізувати практичний приклад використання штучного інтелекту у сфері освітніх послуг. Розроблений інструмент забезпечив миттєву реакцію на запити абітурієнтів, скоротивши час очікування відповіді до 1–2 секунд. На основі інтегрованої бази знань (FAQ) чат-бот надавав точні, релевантні та узгоджені з політикою вступної кампанії відповіді. Це суттєво підвищило якість інформаційної підтримки та забезпечило прозорість процесу вступу.

До основних переваг інтеграції належать простота використання як для кінцевого користувача, так і для адміністратора системи, висока швидкість реакції, релевантність відповідей та можливість масштабування рішення для різних факультетів і спеціальностей. Це підтверджує

доцільність застосування подібних рішень у сфері освіти, адже вони сприяють підвищенню доступності інформації, зменшенню навантаження на співробітників університету та створенню більш позитивного досвіду для абітурієнтів.

Крім технічних показників, результати експериментальної перевірки свідчать про суттєве зростання зацікавленості користувачів: кількість звернень до чат-бота зростала щотижнево, а відвідуваність сторінки FAQ збільшилася більш ніж утричі. Додатково відзначимо, що понад половина відвідувачів після впровадження активно взаємодіяли саме з чат-ботом, що свідчить про довіру до його відповідей. Опитування користувачів показало високі оцінки за критеріями чіткості та швидкості відповідей, а також загального задоволення від взаємодії. Це підтверджує не лише технічну ефективність рішення, але й його практичну цінність для кінцевих користувачів.

Висновки. Інтеграція чат-бота на базі OpenAI GPT у вебсайт університету продемонструвала високу ефективність як інструменту цифрової трансформації освітньої установи. Середній час формування відповіді становив 1,2 с, причому 92 % звернень оброблялися менш ніж за 2 секунди, що забезпечує зручність інтерактивної взаємодії. Використання системи сприяло зростанню активності: кількість відвідувачів сторінки збільшилася з 23 до 76 на день, а середній час перебування – з 1,1 до 4,3 хвилини. Опитування показало високий рівень задоволеності: 91 % позитивно оцінили чіткість відповідей, 95 % – швидкість, 89 % – загальне враження. Система дозволила автоматизувати значну частину рутинних інформаційних процесів, знизити навантаження на працівників приймальної комісії та підвищити доступність послуг для абітурієнтів.

Зростання активності відвідувачів, збільшення кількості звернень та позитивна оцінка користувачами швидкості й точності відповідей доводять, що впровадження інтелектуальних рішень на основі ШІ сприяє покращенню якості комунікації та формує позитивний імідж університету як інноваційного закладу.

Отримані результати також свідчать про перспективність подальшого розвитку цієї технології: розширення бази знань, впровадження багатомовної підтримки, інтеграція з іншими освітніми сервісами та адаптація системи для різних факультетів. Отже, чат-бот на основі штучного інтелекту може стати ключовим елементом цифрової екосистеми університету, орієнтованої на потреби сучасних студентів і вступників.

Бібліографічний список

1. Chen H., Wang L. Artificial intelligence-enabled intelligent assistant for personalized and adaptive learning in higher education. *Education and Information Technologies*. 2023. Vol. 28, No 2. P. 1501–1520. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11588-7>.
2. Corrigan R., Brown A., Li X. Building responsible AI chatbot platforms in higher education: An evidence-based framework from design to implementation. *Frontiers in Education*. 2025. Vol. 10. Article 1604934. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1604934>.
3. Dempere J., Modugu K., Allam H., Ramasamy L. K. The impact of ChatGPT on higher education. *Frontiers in Education*. 2023. Vol. 8. Article 1206936. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1206936>.
4. Fiialka S., Kornieva Z., Honcharuk T. ChatGPT in Ukrainian education: Problems and prospects. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*. 2023. Vol. 18, No 17. P. 236–250. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i17.39657>.
5. Іванчук Н. В., Семененко В. М. Використання чат-ботів у закладах вищої освіти. *Інноваційна педагогіка*. 2024. № 69 (1). С. 271–275. URL: http://innovpedagogy.od.ua/archives/2024/69/part_1/48.pdf (дата звернення: 20.01.2025).
6. Kaur P., Sharma R., Patel S. Ethical implications of ChatGPT in higher education: A scoping review. *Frontiers in Education*. 2023. Vol. 8. Article 1379796. <https://doi.org/10.3389/educ.2024.1379796>.
7. Ковальчук Л. В. Використання штучного інтелекту у вищій школі: перспективи та виклики. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки*. 2024. № 182. С. 140–145. URL: <https://visnyk.chnpu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/671/708> (дата звернення: 20.01.2025).
8. Labadze L., Grigolia M., Machaidze L. Role of AI chatbots in education: Systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2023. Vol. 20. P. 56. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00426-1>.
9. Леонтєва І. Інтеграція цифрових сервісів у систему вищої освіти. *Освітологічний дискурс*. 2024. № 1 (182). С. 55–62. URL: [https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/45620/1/I_Leontieva_OPN_1\(182\)_FPO.pdf](https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/45620/1/I_Leontieva_OPN_1(182)_FPO.pdf) (дата звернення: 20.01.2025).
10. McGrath C., Farazouli A., Cerratto-Pargman T. Generative AI chatbots in higher education: A review of an emerging research area. *Higher Education*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10734-024-01288-w>.
11. Nugroho A. S., Handayani R. Chatbots implementation for student admission. *Journal of Software Engineering and Simulation*. 2024. Vol. 10, No 11. P. 44–52.
12. Олійник Т. І. Перспективи застосування технологій штучного інтелекту в освітньому процесі. *Наука і освіта*, 2024. № 1. С. 74–79. URL: https://www.scienceandeducation.pdpu.edu.ua/doc/2024/1_2_024/8.pdf (дата звернення: 20.01.2025).
13. Prokhorova Y., Gujrati R., Uygun H. The use of AI chatbots in higher education: The problem of plagiarism. *Review of Artificial Intelligence in Education*. 2024. Vol. 5. e031. <https://doi.org/10.1002/raie.031>.
14. Wollny S., Schneider J., Di Mitri D., Weidlich J., Rittberger M., Drachsler H. Are we there yet? A systematic literature review on chatbots in education. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 4. 654924. <https://doi.org/10.3389/frai.2021.654924>.
15. Zhang Y., Kumar A., Lee J. ChatEd: A chatbot leveraging ChatGPT for an enhanced learning experience. *arXiv Preprint*. 2023. arXiv:2401.00052. <https://arxiv.org/abs/2401.00052>.

Стаття надійшла 24.01.2025

ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДІВ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМУВАННЯ І ПАТЕРНІВ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ СІЛЬСЬКИХ РЯТУВАЛЬНИХ ФОРМУВАНЬ

Анатолій Тригуба¹, д. т. н., Лілія Коваль², ад'юнкт, Андрій Татомир¹, к. т. н., Олег Боярчук¹, к. т. н., Роман Падюка¹, к. т. н., Володимир Станько¹, к. е. н.

¹ Львівський національний університет природокористування, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

² Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Львівська обл., Україна,

e-mail: trianamik@gmail.com; kovallilia494@gmail.com; andrew.tatomyr@gmail.com; padyukari@lnup.edu.ua; VStanko@ukr.net

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.208-217>

Тригуба А., Коваль Л., Татомир А., Боярчук О., Падюка Р., Станько В. Ефективність методів об'єктно-орієнтованого програмування і патернів для планування сільських рятувальних формувань

У статті обґрунтовано підхід до підвищення ефективності програмних моделей, призначених для планування добровільних рятувальних формувань у сільських громадах, на основі інтеграції методів об'єктно-орієнтованого програмування та патернів проектування. Показано, що поєднання принципів SOLID із використанням патернів Strategy та Observer забезпечує суттєве зменшення архітектурної складності та створює передумови для розроблення масштабованих і гнучких рішень, які здатні адаптуватися до зміни алгоритмів і зовнішніх умов. Реалізовані програмні модулі мовою Python 3.12 дозволили провести експериментальне оцінювання впливу підходів програмування на ключові показники якості системи. Дослідження виконано на прикладі завдань планування розташування добровільних рятувальних формувань для Шептицької міської територіальної громади Львівської області. Результати доводять, що використання класичних процедурних підходів є недостатньо ефективним, оскільки такі системи характеризуються низькою гнучкістю, значними витратами на супровід і слабкими можливостями повторного використання коду. Перехід до класичного об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) суттєво покращує показники, однак максимальний ефект забезпечує інтеграція ООП з патернами, що дозволило підвищити якість реалізації до 0.92, масштабованість – до 0.89, повторне використання компонентів – до 0.91 та водночас знизити складність архітектури до 0.40. Це підтверджує доцільність впровадження патернів для побудови сучасних інформаційних систем у сфері безпеки та планування рятувальної інфраструктури в сільських громадах. Практична значущість полягає в можливості подальшої інтеграції розроблених модулів у системи просторового моделювання й оптимізації рятувальних формувань. Перспективи досліджень передбачають розширення набору алгоритмів оптимізації, застосування стохастичних і робастних методів, а також використання динамічних просторових даних для формування комплексного інструментарію підтримки управлінських рішень для громад.

Ключові слова: об'єктно-орієнтоване програмування, патерни проектування, ефективність, сільські громади, рятувальні формування, інформаційні системи, оптимізація.

Tryhuba A., Koval L., Tatomyr A., Boiarchuk O., Padiuka R., Stanko V. Effectiveness of object-oriented programming methods and patterns for planning rural rescue teams

The article substantiates an approach to improving the effectiveness of software models designed for planning voluntary rescue teams in rural communities based on the integration of object-oriented programming methods and design patterns. It is shown that combining SOLID principles with the use of Strategy and Observer patterns significantly reduces architectural complexity and creates the conditions for developing scalable and flexible solutions that can adapt to changes in algorithms and external conditions. The software modules implemented in Python 3.12 allowed for an experimental assessment of the impact of programming approaches on key system quality indicators. The research was carried out using the example of tasks for planning the location of volunteer rescue teams for Sheptytskyi urban territorial community in Lviv region. The results prove that the use of classical procedural approaches is not effective enough, since such systems are characterized by low flexibility, significant maintenance costs, and poor code reuse capabilities. The transition to classic object-oriented programming (OOP) significantly improves performance, but the maximum effect is achieved by integrating OOP with patterns, which has increased the quality of implementation to 0.92, scalability to 0.89, component reuse to 0.91, and at the same time reduced the complexity of the architecture to 0.40. This confirms the feasibility of implementing patterns for building modern information systems in the field of security and planning rescue infrastructure in rural communities. The practical significance lies in the possibility of further integration of the developed modules into systems for spatial modeling

and optimization of rescue formations. Research prospects include expanding the set of optimization algorithms, applying stochastic and robust methods, and using dynamic spatial data to form a comprehensive set of tools to support management decisions for communities.

Keywords: object-oriented programming, design patterns, efficiency, rural communities, rescue teams, information systems, optimization.

Постановка проблеми. Сучасні виклики, пов'язані з безпекою сільських громад, зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до організації та планування діяльності добровільних рятувальних формувань. В умовах воєнних дій, техногенних аварій та природних катастроф особливого значення набуває питання підвищення готовності місцевих громад до оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Традиційні методи планування рятувальних структур ґрунтуються переважно на статистичних даних та експертних оцінках, що в багатьох випадках не забезпечує достатньої адаптивності й гнучкості системи [3]. У таких умовах застосування інформаційних технологій, зокрема об'єктно-орієнтованого програмування та патернів проєктування, відкриває можливості для створення ефективних програмних засобів моделювання та прогнозування потреби у формуванні рятувальних структур у сільських громадах.

Значна частина досліджень у галузі програмної інженерії акцентує увагу на важливості застосування патернів як універсальних рішень для проєктування гнучких і масштабованих програмних систем. Вони забезпечують повторне використання коду, структурованість архітектури та зменшення ризику помилок при розробці складних систем [10]. У поєднанні з методами об'єктно-орієнтованого програмування це дозволяє створювати інструменти підтримки ухвалення рішень, здатні враховувати просторові, демографічні та інфраструктурні характеристики сільських територій. Таким чином, поєднання методів програмної інженерії з моделями цивільного захисту дає змогу побудувати інноваційний підхід до планування рятувальних формувань.

Окремим викликом є інтеграція таких рішень у практичну діяльність місцевих органів влади та громадських організацій. Важливою стає можливість створення гнучких моделей, які можна адаптувати до конкретних умов території, враховуючи як густоту населення, так і доступність транспортної інфраструктури чи близькість критичних об'єктів. Сучасні дослідження у сфері громадської безпеки наголошують на тому, що цифрові інструменти для підтримки ухвалення рішень мають значно підвищувати стійкість громад і сприяти зменшенню наслідків надзвичайних

ситуацій [19]. Це обґрунтовує актуальність дослідження ефективності методів об'єктно-орієнтованого програмування та патернів для розробки програмних систем планування добровільних рятувальних формувань.

У цій статті запропоновано підхід до планування добровільних рятувальних формувань у сільських громадах на основі використання методів об'єктно-орієнтованого програмування та патернів проєктування. Запропонована концепція дозволяє створити адаптивні програмні моделі, які враховують особливості інфраструктури та демографічної ситуації на місцях, забезпечуючи підвищення точності прогнозування потреби у формуваннях та оптимізацію їхнього розташування. Таким чином, робота поєднує результати досліджень у сфері програмної інженерії та практичні завдання цивільного захисту, спрямовані на підвищення стійкості та безпеки сільських громад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науково-прикладне завдання, яке стосується планування добровільних рятувальних формувань у сільських громадах, перебуває на перетині двох напрямів, які потребують використання класичних моделей розташування об'єктів та сучасної програмної інженерії. У дослідженнях з управління ризиками і цивільного захисту послідовно підкреслюється, що локальна спроможність громад залежить від завчасного планування сил реагування, логістики та стійкості інфраструктури [12], а також від залучення добровольців і коректної інтеграції їх роботи у формальні процедури реагування [17]. Для сільських територій із розрідженою мережею доріг та низькою густотою населення це ставить особливі вимоги до просторової оптимізації розташування рятувальних підрозділів і пунктів базування.

Методологічну основу просторового планування задають моделі розташування-покриття й наближеного оптимального розташування: р-медіана, задача розташування з максимальним покриттям (MCLP), задача мінімального покриття (LSCP) та їхні розширення з часовими й імовірнісними обмеженнями [2; 8; 9; 13]. Узагальнений виклад цих підходів і сучасні алгоритмічні напрацювання наведено в монографіях Даскіна та оглядах Мюррея, де показано зв'язок між якістю

сервісу, часом доїзду та конфігурацією мережі [1.10; 1.11]. У прикладних роботах для служб екстреної допомоги доведено чутливість рішень до специфіки дорожньої мережі, сезонності трафіку та багатокритеріальних компромісів між охопленням і навантаженням на формування [2; 1.11]. Водночас більшість цих праць концентрується на оптимізаційних моделях і обмежено розкриває, як саме програмна архітектура систем підтримки ухвалення рішень впливає на відтворюваність розрахунків, масштабованість і адаптивність до нових даних.

У програмній інженерії ключову роль відіграють об'єктно-орієнтовані підходи та патерни проектування, що забезпечують повторне використання рішень, низьку зв'язаність компонентів і чітке відокремлення відповідальностей. Базові ідеї зафіксовано у класичних працях «Design Patterns» (GoF), «Refactoring» та «Clean Architecture», доповнених практиками SOLID і каталогами архітектурних стилів [5; 7; 1.14; 1.15]. Однак у більшості публікацій акцент зроблено або на загальних принципах якості коду, або на корпоративних інформаційних системах; доменно-специфічні кейси для цивільного захисту, де поєднуються геоінформаційні, оптимізаційні й симуляційні компоненти, висвітлено фрагментарно. Саме тут виникає дослідницький вакуум: як добір патернів (наприклад, Strategy, Observer, Factory, Composite) і дотримання SOLID впливають на достовірність моделювання доступності, стабільність інтеграції з алгоритмами розташування та витрати на супровід системи у довгому циклі експлуатації.

Паралельно відбувся різкий поступ у відтворюваному просторовому аналізі: відкриті дані та інструменти на кшталт OSMnx суттєво спростили побудову дорожніх графів, обчислення ізохрон і моделювання транспортної доступності для сценаріїв екстреного реагування [4]. Це створює передумови для модульних систем, де геоінформаційні обчислення, оптимізаційні моделі та шар ухвалення рішень розв'язуються окремими підсистемами з чіткими інтерфейсами. Водночас у літературі рідко порівнюють «якість архітектури» таких систем між різними підходами об'єктно-орієнтованого програмування (ООП), обмежуючись метриками продуктивності або точності просторових результатів без аналізу структурної еволюційності коду.

У сучасних роботах з управління ризиками в громадах дедалі частіше підкреслюється роль добровільних ініціатив, гнучких схем залучення та навчання, а також потреба в аналітичних платформах, що швидко пристосовуються до змін

середовища [1.1; 1.18; 1.19; 1.14]. Звідси випливає вимога до архітектури програмних рішень: підтримка сценарного аналізу, прозорої валідації даних і життєвого циклу моделей, можливість розширення джерел даних і конфігурації обмежень без «ломки» ядра. Патерни проектування тут не лише виконують «естетичну» роль гарної інженерії, а стають технічним механізмом забезпечення відтворюваності й перевіреності результатів для управлінських рішень у сфері безпеки.

Підсумовуючи огляд стану питання в науці, можна відзначити, що оптимізаційні моделі розташування рятувальних формувань достатньо формалізовані й багаторазово апробовані [2; 6; 9]. Інструментарій відкритих геоданих та мережевого аналізу дозволяє будувати реалістичні карти доступності [4], а ООП-практики з патернами задають перевірені шаблони для формування масштабованих систем [5; 7; 1.14]. Проте перехресні дослідження, які кількісно оцінюють внесок конкретних ООП-рішень і патернів в ефективність комплексних систем планування сільських рятувальних формувань (точність, стійкість до змін, вартість супроводу, час обчислень, прозорість перевірки), залишаються поза увагою науковців. Ця прогалина і визначає актуальність нашої роботи, яка стосується обґрунтування ефективності ООП-методів і патернів у задачі розробки інструментарію для підтримки управлінських рішень під час планування розташування рятувальних формувань на території сільських громад.

Постановка завдання. Для підвищення ефективності планування систем безпеки у сільських громадах доцільним є застосування об'єктно-орієнтованих методів програмування та патернів проектування, які дозволяють створювати гнучкі, масштабовані й відтворювані моделі підтримки управлінських рішень. Запропонований підхід передбачає поєднання класичних моделей розташування рятувальних формувань із сучасними інструментами програмної інженерії, що забезпечує можливість моделювання різних сценаріїв реагування та оптимізації просторового розташування добровільних рятувальних структур. Це дозволяє враховувати не лише транспортні та демографічні характеристики територій, а й вимоги до швидкості реагування і стійкості до змін у проєктному середовищі.

Мета дослідження полягає у визначенні ефективності методів об'єктно-орієнтованого програмування та патернів проектування під час створення моделей планування розташування

добровільних рятувальних формувань у сільських громадах. Завданням є обґрунтування того, як архітектурні рішення на основі патернів сприяють підвищенню адаптивності та масштабованості систем, а також зменшують ризики помилок під час розробки та супроводу. Запропонований підхід орієнтований на створення програмних модулів, що відображають просторову й організаційну специфіку сільських територій і дозволяють досягати таких результатів, як скорочення часу прибуття рятувальних підрозділів до місць виникнення надзвичайних ситуацій, зниження витрат на їх розташування, підвищення доступності послуг безпеки для населення та раціональне використання обмежених ресурсів громад.

Виклад основного матеріалу. Наше дослідження спрямоване на оцінювання ефективності методів ООП та патернів проектування під час створення моделей планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад. Основна увага приділяється визначенню того, як архітектурні рішення впливають на здатність системи бути масштабованою, адаптивною та відтворюваною.

Під ефективністю методів ООП та патернів у нашому дослідженні розуміється не лише швидкість алгоритмів, а й здатність системи до модифікації, зрозумілості її структури та зниження ризику помилок під час розробки. Для визначення ефективності вводиться інтегральний показник:

$$E = \alpha \cdot Q_r + \beta \cdot M_s + \gamma \cdot F_r + \delta \cdot C_m, \quad (1)$$

де Q_r – якість реалізації (точність і коректність роботи алгоритмів); M_s – масштабованість системи (можливість обробки більших обсягів даних без зниження продуктивності); F_r – повторне використання коду (code reusability); C_m – міра складності архітектури (complexity measure); $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – відповідно вагові коефіцієнти, що визначаються експертами.

Для забезпечення об'єктивності інтегрального показника вагові коефіцієнти визначалися експертним шляхом. До експертної групи увійшли п'ять фахівців у сфері ООП та просторового моделювання рятувальних формувань, які незалежно оцінили відносну важливість кожного критерію. Узагальнення їхніх оцінок виконувалося за методом середнього зваженого, що дало змогу уникнути домінування окремих суджень та забезпечити збалансованість ваг. Такий підхід допоміг сформувати узгоджену систему пріоритетів.

Якість реалізації Q_r відображає точність і коректність роботи алгоритмів у системі. Вона формалізується через середню відносну похибку розрахунків:

$$Q_r = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}, \quad (2)$$

де y_i – реальні значення досліджуваного показника (наприклад, час доїзду, визначений за виробничими спостереженнями або з використанням доступних сервісів); \hat{y}_i – значення досліджуваного показника, отримані програмною моделлю; n – кількість тестових прикладів.

Якщо Q_r наближається до 1, це засвідчує високу точність і надійність моделі.

Масштабованість M_s визначається здатністю системи працювати з більшими обсягами даних без суттєвої втрати продуктивності. Вона визначається за формулою

$$M_s = \frac{T(n)}{T(k \cdot n)}, \quad (3)$$

де $T(n)$ – тривалість виконання програми за обробки n об'єктів; $T(k \cdot n)$ – тривалість виконання при збільшенні вхідних даних у k разів.

Якщо $M_s \approx \frac{1}{k}$, то система масштабується лінійно. Відхилення від цього значення вказує на втрату продуктивності.

Показник повторного використання коду F_r відображає, яку частину коду може бути використано повторно в інших модулях або проектах. Цей показник визначається за формулою

$$F_r = \frac{N_{reuse}}{N_{total}} \times 100\%, \quad (4)$$

де N_{reuse} – кількість модулів (класів, методів), що були повторно використані; N_{total} – загальна кількість модулів у системі.

Високе значення F_r вказує на те, що архітектура побудована правильно, з дотриманням принципів модульності та інкапсуляції.

Показник C_m використовується для оцінювання складності архітектури, що відображає цикломатичну складність (Cyclomatic Complexity):

$$C_m = R - N + 2P, \quad (5)$$

де R – кількість ребер у графі керування програмою; N – кількість вершин у графі; P – кількість незалежних компонентів (наприклад, класів або підпрограм).

Чим вище значення C_m , тим складніше супроводжувати систему. Оптимальним вважається рівень $C_m \leq 10$ для окремого модуля.

Клас `Community` моделює сільську громаду, враховуючи її назву, кількість населення та географічний центр. Він забезпечує розрахунок потреби в рятувальних ресурсах. Клас `RescueUnit` представляє окреме рятувальне формування з вказанням місця розташування та конфігурації, а також дозволяє перевірити його доступність для реагування на надзвичайні ситуації. Разом ці класи формують основу вхідних даних для системи.

Для моделювання транспортної мережі використовується клас `RoadNetwork`, який описує вузли, ребра та ваги графа. Саме на його основі виконуються розрахунки часу переміщення підрозділів. Завантаження й перетворення геоінформаційних даних здійснюється через клас `GISAAdapter`, який отримує дані з відкритих картографічних ресурсів і формує з них дорожній граф. Для підвищення точності оцінки використовується клас `TravelTimeEstimator`, який, спираючись на профілі швидкості, оцінює час доїзду рятувальних формувань до громад. Коректність даних і побудованих моделей перевіряє клас `Validator`, що знижує ризик отримання помилкових результатів.

Ядром системи виступає клас `Planner`, який реалізує патерн `Strategy`. Він дозволяє динамічно підключати різні алгоритми оптимізації залежно від завдань – мінімізація середнього часу доїзду (`MedianStrategy`), максимізація охоплення території (`MCLPStrategy`) або мінімізація кількості формувань для забезпечення повного покриття (`LSCPStrategy`) території громади. Базовий абстрактний клас `OptimizationStrategy` визначає єдиний інтерфейс для всіх стратегій. Завдяки цьому архітектура легко розширюється новими методами оптимізації без зміни основного планувальника.

Важливим елементом є клас `MapRenderer`, який відповідає за візуалізацію результатів планування на карті. Це забезпечує зрозуміле представлення інформації для користувачів і ухвалення управлінських рішень.

Система також реалізує патерн `Observer`, що дає змогу автоматично реагувати на зміни вхідних даних. Клас `DataSource` виступає генератором подій, а `CommunityObserver` отримує оновлення й передає їх до `Planner` для повторного виконання оптимізації. Такий підхід забезпечує адаптивність та актуальність рішень навіть за динамічних умов у громадах.

Представлена діаграма (див. рис. 1) відображає комплексну архітектуру, яка охоплює всі етапи, починаючи від збору та перевірки даних до вибору оптимального сценарію розташування рятувальних формувань та візуалізації результатів.

Використання патернів `Strategy` та `Observer` забезпечує гнучкість, стійкість і можливість масштабування системи.

На рис. 2 наведено фрагмент програмного коду, реалізованого мовою Python, що ілюструє використання патерну `Strategy` в системі планування розташування добровільних рятувальних формувань на території сільських громад.

```
from abc import ABC, abstractmethod
from typing import List

# Абстрактна стратегія оптимізації
class OptimizationStrategy(ABC):
    @abstractmethod
    def solve(self, communities: List[str], units: int) -> dict:
        pass

# Стратегія p-median
class MedianStrategy(OptimizationStrategy):
    def solve(self, communities, units):
        return {"method": "p-median", "units": units, "result": "Min avg time"}

# Стратегія максимального покриття
class MCLPStrategy(OptimizationStrategy):
    def solve(self, communities, units):
        return {"method": "MCLP", "units": units, "result": "Max coverage"}

# Планувальник, що реалізує патерн Strategy
class Planner:
    def __init__(self, strategy: OptimizationStrategy):
        self.strategy = strategy

    def set_strategy(self, strategy: OptimizationStrategy):
        self.strategy = strategy

    def allocate_units(self, communities, units):
        return self.strategy.solve(communities, units)

# Демонстрація використання
communities = ["Village A", "Village B", "Village C"]
planner = Planner(MedianStrategy())
print(planner.allocate_units(communities, 3))

planner.set_strategy(MCLPStrategy())
print(planner.allocate_units(communities, 3))
```

Рис. 2. Фрагмент програмного коду реалізації патерну `Strategy` в системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад

Fig. 2. Fragment of the program code implementing the `Strategy` pattern in the system for planning the location of voluntary rescue teams for rural communities

У представленому фрагменті коду (див. рис. 2) показано абстрактний клас стратегії оптимізації та його конкретні реалізації. Зокрема, метод `p-median` для мінімізації середнього часу доїзду до місць виникнення надзвичайних ситуацій та метод `MCLP` для максимального охоплення території. Клас `Planner` виконує роль керуючого модуля, який дозволяє динамічно змінювати обрану стратегію та формувати план розташування підрозділів. Подібний підхід забезпечує гнучкість архітектури й адаптивність системи до різних сценаріїв функціонування рятувальних формувань.

На рис. 3 наведено фрагмент програмного коду, який демонструє реалізацію патерну `Observer` у системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад.

У представленому фрагменті коду (див. рис. 3) клас DataSource виступає генератором подій, а клас CommunityObserver реагує на зміни даних і передає їх до планувальника для повторного розрахунку оптимального розташування. Використання цього патерну забезпечує динамічне оновлення рішень системи у разі появи нових даних або зміни умов, що є особливо важливим для підвищення оперативності й актуальності управлінських рішень у громадах.

Поєднання методів ОПП та запропонованих патернів створює цілісну методологію, в якій математичні моделі оптимізації інтегруються з архітектурними принципами програмної інженерії. Методи ООП забезпечують модульність, інкапсуляцію та спадкування, що дозволяє будувати систему у вигляді взаємопов'язаних компонентів. Патерни, своєю чергою, надають цим компонентам гнучкості та динамічності. Зокрема, патерн Strategy дозволяє легко змінювати алгоритми планування залежно від умов, а патерн Observer забезпечує автоматичне оновлення даних та реакцію системи на зовнішні події.

```

from abc import ABC, abstractmethod

# Абстрактний спостерігач
class Observer(ABC):
    @abstractmethod
    def update(self, data):
        pass

# Конкретний спостерігач (громада)
class CommunityObserver(Observer):
    def update(self, data):
        print(f"CommunityObserver отримав нові дані: {data}")

# Джерело даних
class DataSource:
    def __init__(self):
        self.observers = []

    def add_observer(self, observer: Observer):
        self.observers.append(observer)

    def notify(self, data):
        for obs in self.observers:
            obs.update(data)

# Демонстрація роботи патерну Observer
source = DataSource()
observer1 = CommunityObserver()
observer2 = CommunityObserver()

source.add_observer(observer1)
source.add_observer(observer2)

# При надходженні нових даних усі спостерігачі автоматично оновлюються
source.notify("Оновлені параметри громади")

```

Рис. 3. Фрагмент програмного коду реалізації патерну

Observer для автоматичного оновлення даних у системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад

Fig. 3. Fragment of the program code implementing the Observer pattern for automatic data updating in the system for planning the location of voluntary rescue teams for rural communities

Синергія між ООП-методами та патернами проявляється у здатності системи одночасно бути структурованою та адаптивною. Формальна архітектура на основі класів та інтерфейсів створює передумови для повторного використання коду, тоді як застосування патернів мінімізує залежності між модулями і знижує складність масштабування. У результаті розробник отримує не лише інструмент для моделювання розташування рятувальних формувань, а й гнучку платформу, яку можна розширювати новими методами оптимізації та сценаріями використання.

Запропоноване поєднання є особливо важливим у системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад. У ній слід забезпечити швидку адаптацію до змін проектного середовища. Завдяки ООП-методам система зберігає логічну цілісність і зрозумілу структуру, а завдяки патернам – здатність до оперативної перебудови та інтеграції нових алгоритмів. Таким чином, методологія демонструє, що саме інтеграція цих двох підходів формує основу ефективних рішень для підвищення ефективності планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад.

Оцінювання ефективності методів ООП та патернів проектування під час створення моделей планування розташування добровільних рятувальних формувань проводилося для умов Шептицької міської територіальної громади Львівської області. Було змодельовано умови, наближені до реальних:

- територія охоплювала 15 населених пунктів з різною кількістю населення;
- у дорожній мережі враховувалася доступність доріг місцевого та регіонального значення, середня швидкість руху автотранспорту становила 60 км/год;
- оцінювався час доїзду рятувальних підрозділів до населених пунктів, а також можливість масштабування системи при збільшенні кількості об'єктів;
- програмна модель будувалася трьома різними підходами – процедурним, класичним ООП без патернів і ООП з використанням патернів Strategy та Observer.

Оцінювання здійснювалося за такими показниками: якість реалізації Q_r , масштабованість M_s , повторне використання коду F_r та складність архітектури C_m . З огляду на завдання щодо планування розташування добровільних рятувальних формувань, де особливо важливими є якість реалізації та масштабованість, вагові коефіцієнти були визначені експертним шляхом та прийнято $\alpha = 0.35$, $\beta = 0.30$, $\gamma = 0.20$, $\delta = 0.15$. Ці значен-

ня забезпечують пріоритетність коректності системи та її здатності до зростання, водночас враховуючи важливість повторного використання модулів і зменшення складності архітектури.

Результати визначення показників інтегральної ефективності методів ОПП та патернів у системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад представлено у таблиці.

На основі отриманих результатів та використання формули (1) встановлено, що інтегральна ефективність процедурного підходу становить лише

0.58. Це свідчить про обмежені можливості використання цього методу в реальних умовах. Для класичного ООП значення ефективності зросло до 0.73 завдяки покращанню масштабованості та повторного використання коду. Найвищі показники зафіксовано для варіанта ООП із патернами, де інтегральна ефективність досягла 0.87. Це підтверджує гіпотезу, що саме поєднання ООП із патернами проектування забезпечує найкращі результати в системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад.

Таблиця. Результати визначення показників інтегральної ефективності методів ОПП та патернів у системі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад

Table. Results of determining the indicators of the integral effectiveness of object-oriented programming methods and patterns in the system of planning the location of voluntary rescue teams for rural communities

Метод	Q_r	M_s	F_r	C_m	E
Процедурний підхід	0.65	0.55	0.40	0.70	0.58
ООП без патернів	0.78	0.72	0.68	0.55	0.73
ООП із патернами	0.92	0.89	0.91	0.40	0.87

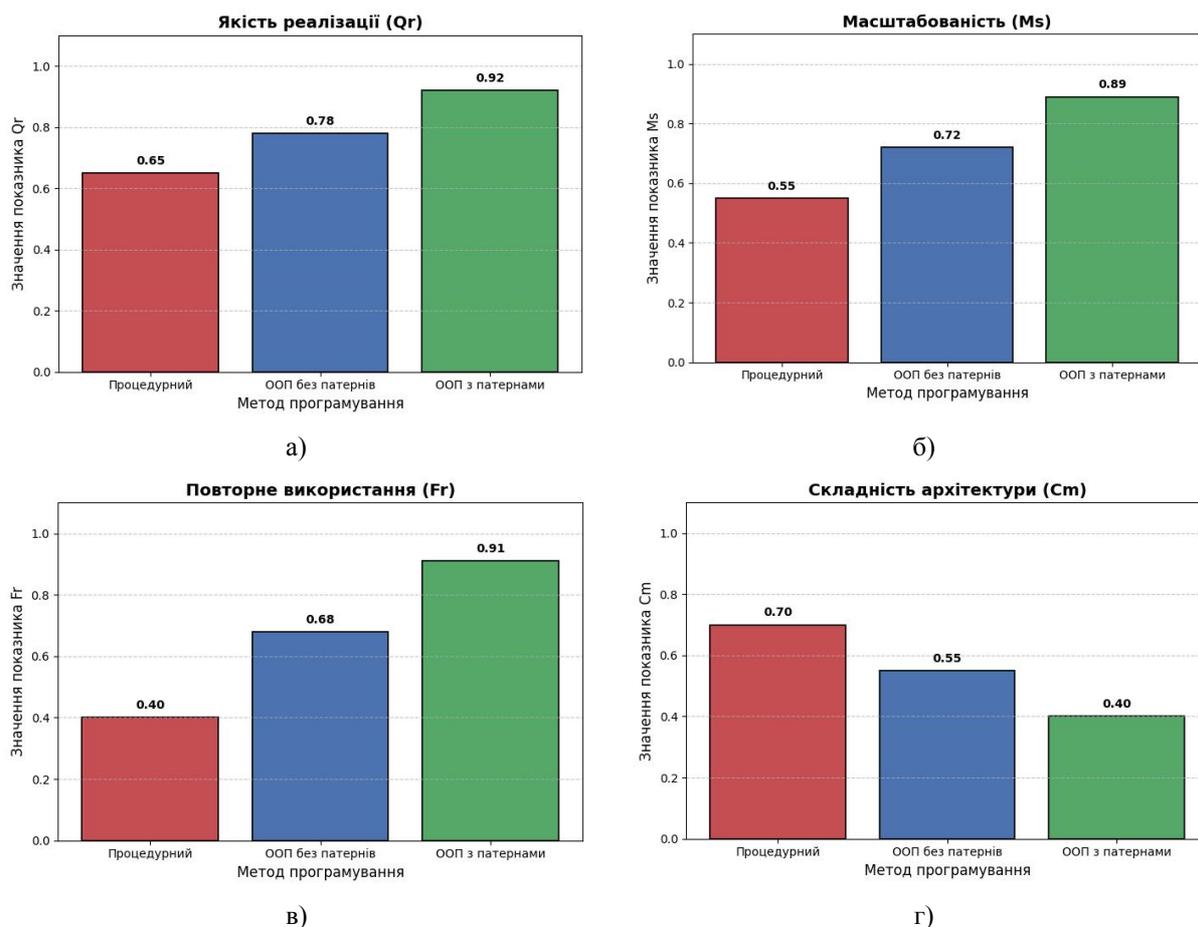


Рис. 4. Діаграми показників якості реалізації Q_r (а), масштабованості M_s (б), повторного використання коду F_r (в) та складності архітектури C_m (г) за різних використовуваних методів програмування

Fig. 4. Diagrams of indicators of implementation quality Q_r (a), scalability M_s (b), code reuse F_r (c), and architectural complexity C_m (d) for different programming methods used

Ми порівняли показник якості реалізації Q , за різних використовуваних методів програмування (див. рис. 4).

Представлені на рис. 4 діаграми підтверджують висновки з таблиці. Найбільший прогрес досягається при переході від процедурного підходу до об'єктно-орієнтованого, однак саме застосування патернів дає найбільший ефект. Якість реалізації зростає від 0.65 до 0.92, а повторне використання коду – більш ніж удвічі (від 0.40 до 0.91). Масштабованість системи у варіанті з патернами становить 0.89, що підтверджує можливість обробки більших обсягів даних без втрати продуктивності. Водночас складність архітектури зменшилася до 0.40, що робить систему зрозумілою та легкою у супроводі.

На підставі проведених досліджень встановлено, що запропонований підхід, який ґрунтується на поєднанні методів ООП і патернів проектування, є найефективнішим для задачі планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад. Він забезпечує високий рівень точності та коректності, дозволяє повторно використовувати модулі й легко інтегрувати нові алгоритми, знижуючи складність архітектури. Отримані результати доводять доцільність впровадження такого підходу у практику розробки інформаційних систем для цивільного захисту, де особливо важливими є адаптивність і швидке реагування на зміни.

Висновки. 1. Виконаний аналіз стану питання в теорії та практиці свідчить, що процедурні підходи до розробки програмних систем для планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад мають низьку гнучкість, слабо масштабовані та характеризуються високою складністю супроводу. Класичне об'єктно-орієнтоване програмування частково зменшує ці недоліки. Однак воно не забезпечує належної адаптивності за врахування зміни зовнішніх умов чи алгоритмів. Пропонується використовувати підхід, який поєднує принципи об'єктно-орієнтованого програмування з патернами проектування.

2. Запропоновано підхід до оцінювання ефективності методів об'єктно-орієнтованого програмування і патернів для планування сільських рятувальних формувань, який поєднує використання класичних моделей просторового розташування рятувальних формувань із застосуванням принципів SOLID і патернів проектування Strategy та Observer. Такий підхід дозволяє створити

архітектуру, що легко масштабується, має нижчу складність та забезпечує повторне використання компонентів.

3. На основі проведених досліджень із розробленими програмними модулями на мові Python 3.12 здійснено оцінювання ефективності методів об'єктно-орієнтованого програмування та патернів проектування під час створення моделей планування розташування добровільних рятувальних формувань, яке проводилося для умов Шептицької міської територіальної громади Львівської області. Встановлено, що процедурний підхід забезпечує найнижчі показники. Зокрема, показник якості реалізації становить 0.65, масштабованість – 0.55, повторного використання компонентів – 0.40. Водночас складність залишалася високою – 0.70. Використання класичного об'єктно-орієнтованого програмування покращило показники якості до 0.78, масштабованості – до 0.72 та повторного використання – до 0.68. При цьому складність становила 0.55. Найкращі результати отримано під час застосування об'єктно-орієнтованого програмування із патернами. Якість реалізації зросла до 0.92, масштабованість – до 0.89, повторне використання – до 0.91, а складність знизилася до 0.40. Це підтверджує переваги інтеграції патернів проектування у системи планування розташування добровільних рятувальних формувань для сільських громад.

4. Надалі слід розширити набір алгоритмів і стратегій оптимізації, залучити стохастичні та робастні методи, інтегрувати динамічні просторові дані та чинники мобільності населення. Окремо слід провести верифікацію на реальних прикладах різних сільських громад та оцінити вплив інших патернів проектування на показники ефективності програмування.

Бібліографічний список

1. Оптимізація безпекової інфраструктури у програмах післявоєнного відновлення з використанням сучасних геоінформаційних систем / А. М. Тригуба, Р. Т. Ратушний, А. Р. Ратушний, Л. С. Коваль, А. І. Івануса. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2025. № 31. С. 196–212. doi: <https://doi.org/10.32447/20784643.31.2025.20>.
2. Adasme P., Viveros A., Dehghan Firoozabadi A. Quadratic p-Median Problem: A Bender's Decomposition and a Meta-Heuristic Local-Based Approach. *Symmetry*. 2024. Vol. 16, No. 9. P. 1114. doi: <https://doi.org/10.3390/sym16091114>.
3. Alexander D. Disaster and Emergency Planning for Preparedness, Response, and Recovery. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. 2015. doi: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.12>.

4. Algorithm for the routes formation of food raw materials procurement on the community territory taking into account the production conditions during emergency situations / A. M. Tryhuba, N. Ya. Koval, A. R. Ratushnyi, I. L. Tryhuba, V. V. Shevchuk. *Applied Aspects of Information Technology*. Odessa: Nauka i Tekhnika, 2023. Vol. 6, No. 1. P. 60–73. doi: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.5>.
5. Almadi S. H. S., Hooshyar D., Ahmad R. B. Bad smells of Gang of Four design patterns: a decade systematic literature review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 18. P. 10256. doi: <https://doi.org/10.3390/su131810256>.
6. A Neural Network Model for Predicting the Duration of Emergency Response Projects / A. Ratushnyi, V. Ptashnyk, L. Koval, P. Lub, A. Tatomyr. *IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*. 2023. 195025. P. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/csit61576.2023.10324279>.
7. Bafandeh Mayvan B., Rasoolzadegan A., Ghavidel Yazdi Z. The state of the art on design patterns: A systematic mapping of the literature. *Journal of Systems and Software*. 2016. Vol. 125. P. 93–118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.11.030>.
8. Continuous Maximum Coverage Location Problem with Arbitrary Shape of Service Areas and Regional Demand / S. Yakovlev et al. *Symmetry*. 2025. Vol. 17. P. 676.
9. Delineations for police patrolling on street network segments with p-median location models / C. Lee, H. Kim, Y. Chun, D. A. Griffith. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13, No. 11. P. 410. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi13110410>.
10. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides. Addison-Wesley, 1995.
11. Intelligent tools for selecting configurations of renewable energy equipment for livestock farms. / T. Hutsol, K. Mudryk, S. Francik, R. Oliinyk. *Energies*. 2023. Vol. 16(22). P. 7605. doi: <https://doi.org/10.3390/en16227605>.
12. Kondysiuk I., Tryhuba I., Boiarchuk O. Intellectual information system for formation of portfolio projects of motor transport enterprises. *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3109. P. 44–52. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3109/paper7.pdf> (Accessed February 09, 2025).
13. Lamontagne S., Carvalho M., Atallah R. Accelerated Benders decomposition and local branching for dynamic maximum covering location problems. *Computers & Operations Research*. 2024. Vol. 167. 106673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106673>.
14. Murray A. T. Beyond location modeling and GIS: Integration and bridging. *Computers & Operations Research*. 2025. Vol. 180. P. 107073. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107073>.
15. On microservice analysis and architecture evolution: a systematic mapping study / V. Bushong et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 17. P. 7856. doi: <https://doi.org/10.3390/app11177856>.
16. Optimal charging facility location and capacity for electric vehicles considering route choice and charging time equilibrium / R. Chen, X. Qian, L. Miao, S. V. Ukkusuri. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 113. P. 104776. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104776>.
17. Substantiating the effectiveness of projects for the construction of dual systems of fire suppression / R. Ratushnyi, P. Khmel, E. Martyn, O. Prydatko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4(3-100). P. 46–53.
18. The Value Formation Model of the Project's Implementation for the Territorial Rescue Structures Creation to a Consequences Elimination of a Military Emergency Situations / A. Tryhuba, A. Ratushnyi, P. Lub, M. Rudynets, O. Visyn. *Proceedings of the 4th International Workshop IT Project Management (ITPM 2023). Conference*. Warsaw, 2023. P. 59–70. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3453/paper6.pdf> (Accessed February 09, 2025).
19. Twigg J., Mosel I. Emergent groups and spontaneous volunteers in urban disaster response. *Environment and Urbanization*. 2017. Vol. 29, No. 2. P. 443–458. doi: <https://doi.org/10.1177/0956247817721413>.
20. Value-based hybrid management of community safety projects: intelligent models for optimal location of volunteer rescue formations / A. Tryhuba, O. Malanchuk, A. Ratushnyi, L. Koval, O. Andrushkiv. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(12). P. 4821. doi: <https://doi.org/10.3390/su16124821>.

Стаття надійшла 12.02.2025

ПРОЄКТУВАННЯ ВЕБОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ КЛІЄНТІВ В АГРАРНІЙ СФЕРІ

*Алла Желєзняк, к. е. н., Роман Падюка, к. т. н., Христина Дзьоба, магістр
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: azheleznyak@ukr.net, radyukaroman@gmail.com, losikhristina@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.218-224>

Желєзняк А., Падюка Р., Дзьоба Х. Проєктування веборієнтованої системи підтримки клієнтів в аграрній сфері

Розглянуто та проаналізовано підходи з проєктування, розробки та функціонування веборієнтованої системи підтримки клієнтів аграрних підприємств. Досліджено найбільш поширені практики та підходи в проєктуванні і реалізації систем підтримки користувачів сайтів. Визначено технології, які стимулюють розвиток форм підтримки клієнтів аграрних підприємств. Встановлено, що основними формами систем підтримки виробників та населення в сільському господарстві є цифрові платформи, кооперативні системи та системи дорадництва. Охарактеризовано найбільш поширені моделі систем підтримки клієнтів, такі як модель самообслуговування, модель інтерактивної підтримки, гібридна модель. Проаналізовано сильні та слабкі сторони їхнього застосування. Описано основні виклики, з якими стикаються розробники веборієнтованих систем підтримки клієнтів.

Наведено аргументи доцільності використання технологій генеративного штучного інтелекту для покращення персоналізованого підходу надання клієнтської підтримки. З'ясовано роль та завдання «живих» агентів та цифрових помічників як найбільш поширених форм підтримки користувачів комерційних інтернет-ресурсів. Розглянуто особливості застосування цифрових помічників порівняно із такими традиційними формами підтримки клієнтів як телефонні лінії, месенджери та консультанти. Обґрунтовано важливість сегментації клієнтів аграрних підприємств як важливого елементу процесу планування та проєктування системи підтримки. Проаналізовано ключові компоненти системи клієнтської підтримки, розглянуто основні функції та варіанти їхньої реалізації.

Засвідчено необхідність комплексного підходу на етапах проєктування систем підтримки клієнтів аграрних виробників на основі інтернет-ресурсів, враховуючи специфіку діяльності, можливості застосування сучасних технологій, частоти та кількості запитів користувачів і наявних ресурсів.

Ключові слова: системи підтримки клієнтів, підходи, проєктування, вебтехнології, аграрна сфера.

Zhelyeznyak A., Padiuka R., Dzioba Kh. Approaches to designing a web-based customer support system for the agricultural sector

This paper examines and analyzes approaches to the design, development, and operation of web-based customer support systems for agricultural enterprises. It examines prevailing practices and methodologies in the design and implementation of website-based user support solutions, identifying technologies that promote the advancement of customer support services in the agricultural sector. It has been established that the primary forms of support systems for producers and the population engaged in agriculture are digital platforms, cooperative systems, and advisory services. Furthermore, the study outlines the most common models of customer support systems, including the self-service model, interactive support model, and hybrid model, and evaluates their respective advantages and limitations. Finally, it highlights the key challenges encountered by developers in creating web-oriented customer support systems.

Arguments are presented for the feasibility of using generative artificial intelligence technologies to improve the personalized approach to customer support. The roles and tasks of “live” agents and digital assistants as the most common forms of support for users of commercial Internet resources, are clarified. The features of using digital assistants are considered in comparison to such traditional forms of customer support as telephone lines, messengers, and consultants. The importance of segmenting agricultural enterprise customers as an important element of the support system planning and design process is substantiated. The key components of the customer support system are analyzed, and the main functions and options for their implementation are considered.

The findings highlight the necessity of a comprehensive approach to designing Internet-based customer support systems for agricultural producers, taking into account the specific nature of their activities, the potential of modern technologies, the frequency and volume of user requests, and the available resources.

Keywords: customer support systems, approaches, design, web technologies, agricultural sector.

Постановка проблеми. Веборієнтовані системи підтримки клієнтів є важливим елементом взаємодії із відвідувачами сайтів комерційних та некомерційних аграрних підприємств, установ та організацій. Це обумовлено тим, що юридичні та фізичні особи, які є клієнтами та партнерами

виробників в аграрній сфері, можуть потребувати технічної та інформаційної підтримки, зворотного зв'язку із різноманітних питань, відповідей на типові запитання тощо.

Проектування веборієнтованих систем підтримки користувачів (Customer Support Systems) є досить складним завданням, оскільки охоплює аналіз потреб цільової аудиторії користувачів, вибору відповідних інструментів та методів взаємодії для реалізації технічного завдання, а також інтеграцію цих систем у загальну архітектуру інформаційної системи аграрного підприємства.

Ефективність реалізації поставлених завдань залежить від наявних ресурсів, бюджетів та можливостей застосування передових технологій клієнтської підтримки. Порушення процесів обслуговування клієнтів та помилки при впровадженні додаткових каналів самообслуговування в доповнення до наявних систем підтримки клієнтів можуть мати негативний ефект та погіршувати фінансові показники діяльності компаній [1].

Завищені очікування клієнтів та зростання конкуренції між різноманітними інтернет-ресурсами в аграрній сфері в умовах розвитку технологій штучного інтелекту, вебтехнологій, маркетингових підходів лише актуалізують увагу до досліджень ефективних підходів у проектуванні систем підтримки користувачів та вибору оптимальних форм та інструментів їхньої реалізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування інформаційних технологій позитивно впливає на процеси обслуговування клієнтів торговельних, туристичних, сервісно-орієнтованих та інших компаній, підприємств чи організацій, де взаємодія з клієнтами є важливим елементом бізнес-процесів [2–4]. Значний вплив на розвиток систем підтримки клієнтів свого часу мали клієнто-орієнтовані інтерфейси вебресурсів, кількість яких із зростанням доступності інтернету суттєво зростає. Результати проведених досліджень науковців свідчать, що створення веборієнтованої системи підтримки клієнтів було пріоритетом багатьох компаній, а якість поданої інформації для клієнта та самої системи мала більший вплив, ніж якість послуг [5; 16–17].

Слід зазначити, що більш ранні дослідження науковців зосереджені на порівнянні ефективності різних форм підтримки користувачів порівняно із онлайн-підтримкою, яка з'явилася із популяризацією інтернет-ресурсів [6; 7]. Хоча інформаційні технології мали значний позитивний вплив на системи обслуговування клієнтів, дослідження

показали також, що надмірне використання технологій містить певні ризики та може негативно вплинути на взаємодію з клієнтами, які очікують персоналізованого підходу та турботи від персоналу компанії [1; 8]. Дослідження реакції споживачів на обслуговування чат-ботами та живими консультантами «агентами» показали позитивний вплив емпатії в обслуговуванні клієнтів у користь живого консультанта [9]. Поява технології генеративного штучного інтелекту та її застосування в системах підтримки користувачів має перспективи вирішити проблему емпатії у взаємодії із чат-ботом [10] та загалом підвищити якість обслуговування [11].

Аналіз останніх досліджень показав, що науковці приділяють значну увагу дослідженню різноманітних аспектів питання, пов'язаного із використанням цих інноваційних технологій для покращення клієнтського обслуговування користувачів інтернет-ресурсів [10–13]. Однак додаткової уваги потребує огляд підходів та моделей веборієнтованих систем підтримки клієнтів в аграрній сфері, виходячи із специфіки прикладної сфери та наявних переваг і недоліків наявних систем підтримки. Аграрна сфера має низку особливостей, пов'язаних із специфікою комерційної діяльності в сільському господарстві. Аграрні підприємства можуть реалізовувати продукцію як на зовнішніх ринках через посередників, так і безпосередньо на внутрішньому ринку населенню, якщо таке підприємство вирощує овочі, фрукти, переробляє сільськогосподарську продукцію. Більшість аграрних підприємств також формують комерційні зв'язки із орендодавцями земельних угідь, а саме власниками паїв та земельних ділянок, які у свою чергу можуть бути активними користувачами веборієнтованих систем підтримки.

Постановка завдання. Наше завдання – аналіз наявних підходів до проектування веборієнтованих систем підтримки клієнтів, дослідження переваг і недоліків найбільш популярних моделей систем підтримки користувачів сайтів, а також розробка рекомендацій для створення більш ефективних і раціональних рішень для аграрних підприємств, які можуть нести позитивний ефект бізнес-процесам та відповідати потребам і очікуванням із боку компаній.

Виклад основного матеріалу. Розвиток та застосування сучасних інформаційних технологій обумовили зміни у способах взаємодії користувачів із різноманітними цифровими онлайн-платформами. Інтернет-ресурси сьогодні – ефективний

інструмент для виконання різноманітних завдань – від пошуку інформації про компанію чи виробника до здійснення покупок, огляду вакансії або ж укладання договору про довгострокове співробітництво. Відвідуючи сайт аграрного підприємства чи його інтернет-магазину, користувач може стикнутися з технічними, інформаційними та іншими проблемами, які можуть виникати під час взаємодії з ресурсом та здійснення операції (наприклад, оплата замовлення або ж повернення товару).

Веборієнтовані системи підтримки клієнтів відіграють ключову роль у створенні позитивного досвіду їх використання для виконання певних завдань. Системи підтримки клієнтів (Customer Support Systems) часто є підмножиною системи управління відносинами з клієнтами (Customer Relationship Management або CRM), яка може передбачати реалізацію таких функцій: управління даними про клієнтів, автоматизація продаж, автоматизація маркетингу, аналітика клієнтів. Дослідження показують, що впровадження CRM є потужним технологічним рішенням для бізнесу, дозволяючи стимулювати зростання та очікування на майбутнє [14]. Яскравим прикладом ефективної CRM-платформи є Salesforce, яка допомагає автоматизувати та виконувати різноманітні завдання, зокрема обслуговування, аналізу та зв'язків із клієнтами.

Побудова системи підтримки користувачів інтернет-ресурсів в аграрній сфері може бути як окремим рішенням для невеликих проектів або ж локальних сайтів із визначеною цільовою аудиторією, так і частиною великої CRM-системи, виходячи із масштабу та цілей проекту.

Розробка ефективної системи підтримки повинна базуватися на попередніх даних про клієнтів, враховувати їхні потреби, попередній досвід, здібності, коротко- та/або довгострокові цілі, а також середовище, в якому вони живуть, працюють або навчаються. Аналіз даних про відвідувачів сайту аграрного підприємства дозволяє визначити потреби цільової аудиторії за сегментами та групами (когортами).

Сегментація клієнтів виробників в аграрній сфері за різними категоріями (рис. 1), допоможе зрозуміти потреби клієнтів, адаптувати контент, продукти чи сервіси до потреб кожного сегмента, а також оптимізувати стратегії взаємодії. Адже невелике фермерське господарство може взаємодіяти лише з мешканцями первинного адміністративного району, а великий агрохолдинг може здійснювати господарську та комерційну діяльність у різних областях чи країнах.

Сегментація користувачів інтернет-ресурсу забезпечує персоналізацію контенту, зростання їх зацікавленості, підвищення конверсії сайту. В

процесі практичної реалізації системи підтримки користувачів інтернет-ресурсу використання інструментів аналітики (наприклад, Google Analytics або Tableau) дозволить проаналізувати ефективність роботи системи підтримки та обробити дані щодо ефективності вирішення запитів клієнтів.

Провівши ґрунтовний аналіз видів господарської діяльності та типів підприємств, які характерні для цієї галузі, можна виділити основні форми систем підтримки в аграрній сфері (рис. 2).

Важливою складовою інформаційної підтримки в сільському господарстві є надання офлайн- та онлайн консультацій населенню з боку аграрних підприємств, так і спеціалізованих систем дорадництва із різноманітних питань. Системи дорадництва (extension services) можуть бути ефективними у сфері надання рекомендацій сільському населенню щодо застосування передових агротехнологій, у сфері управління господарством та з питань збуту продукції. Консультаційної підтримки потребують і малі та середні виробники сільськогосподарської продукції, оскільки, наприклад, часто стикаються з невизначеністю погоди, яка впливає на врожайність сільськогосподарських культур. До інших проблем дрібних виробників в аграрній сфері можна віднести застарілість інформації щодо технологічних процесів виробництва, неефективність боротьби із шкідниками, відсутність ефективних ланцюгів постачання та збуту сільськогосподарської продукції тощо.

До основних інструментів систем підтримки клієнтів, які можуть бути реалізовані аграрними підприємствами відповідно до їхнього типу, виду та масштабу діяльності, можна віднести: CRM-системи, програмне забезпечення бази знань, програмне забезпечення для живого чату, програмне забезпечення для обробки відео та зображень, чат-боти та інструменти на основі ШІ, інструменти для опитувань клієнтів та опрацювання відгуків, форуми спільноти тощо.

Основним етапом проектування веборієнтованої системи підтримки клієнтів є вибір моделі та підходів у проектуванні. Система підтримки клієнтів може бути розроблена на основі підходів та моделі самообслуговування, інтерактивної підтримки, гібридної моделі, проактивної підтримки, надання допомоги на випередження (до появи запиту в клієнта), реалізацію інтеграції із спільнотами, забезпечення мультимедіальності обслуговування. Кожна із цих моделей та підходів має свої плюси та мінуси, які впливають на вибір системи та інструментів її реалізації. Найбільш поширені моделі систем підтримки клієнтів наведені в табл. 1 та надано рекомендації щодо їх застосування аграрними виробниками із врахуванням масштабу та виду діяльності.



Рис. 1. Сегментація користувачів інтернет-ресурсів
Fig. 1. Segmentation of Internet resource users



Рис. 2. Форми систем підтримки виробників та населення в сільському господарстві
Fig. 2. Forms of support systems for producers and the population in agriculture

Таблиця 1. Порівняльна характеристика моделей підтримки клієнтів
Table 1. Comparative characteristics of customer support models

Назва моделі	Позитивні сторони застосування	Недоліки застосування	Рекомендація для застосування в аграрній сфері
Модель самообслуговування	<ul style="list-style-type: none"> - доступність 24/7; - зниження навантаження на службу підтримки; - зменшення витрат на персонал; - легкість масштабування 	<ul style="list-style-type: none"> - не підходить для складних або специфічних запитів; - може створювати негативний досвід у випадку застарілої інформації; - не передбачає особистої взаємодії 	Малі фермерські господарства (рослинництво, тваринництво, сільськогосподарські кооперативи)
Модель інтерактивної підтримки	<ul style="list-style-type: none"> - швидка та персоналізована допомога користувачу; - можливість вирішення складних і нестандартних запитів; - підвищення лояльності користувачів 	<ul style="list-style-type: none"> - значні витрати на персонал і технічну інфраструктуру; - потреба в забезпеченні цілодобової роботи для міжнародної аудиторії; - затримки під час високого навантаження (у пікові години) 	Середні аграрні підприємства (із спеціалізацією в тваринництві; крафтові виробники; нішеві виробники в рослинництві)
Гібридна модель	<ul style="list-style-type: none"> - оптимізація витрат завдяки автоматизації простих завдань; - збереження високої якості обслуговування для складних запитів; - масштабованість і гнучкість 	<ul style="list-style-type: none"> -складність впровадження та налаштування інтегрованих систем; -можливі затримки у передачі запитів до операторів; - вимоги до постійного оновлення баз знань та алгоритмів ШІ 	Великі агропідприємства та агрохолдинги (диверсифіковане виробництво, широкий асортимент продукції)

Під самообслуговуванням клієнтів слід розуміти набір інструментів та ресурсів, які дозволяють клієнтам самостійно виконувати завдання [15]. Прикладом реалізації моделі самообслуговування можуть бути розділи частих запитань FAQ, бази знань, форуми користувачів.

Експерти компанії Zendesk визначають самообслуговування як функцію взаємодії з клієнтами, за допомогою якої клієнти можуть самостійно знаходити рішення своїх проблем або отримувати доступ до інформації за допомогою онлайн-ресурсів, таких як поширені запитання, бази знань, портали та агенти ШІ [15]. На нашу думку агенти ШІ, які набули популярності із розвитком технологій штучного інтелекту, зокрема генеративного штучного інтелекту, є більш характерними для гібридної моделі підтримки, хоча безумовно можуть допомагати користувачу вирішувати низку питань самостійно на спеціально навчених чат-ботах із стандартним набором запитань.

Використання моделі самообслуговування малими фермерськими господарствами та сільськогосподарськими кооперативами дозволить досягнути мінімізації витрат на персонал, можливості швидко надавати базову інформацію про ціни, наявність продукції, доставку та відповідати на типові й повторювані запити.

Модель інтерактивної підтримки охоплює взаємодію відвідувача сайту з реальними операторами або чат-ботами в режимі реального часу та може бути реалізована у формі гарячої лінії служби підтримки, спілкування в чаті в режимі реального часу. Застосування моделі інтерактивної підтримки крафтовими виробниками або ж виробниками нішевої продукції задовольнить потребу клієнтів у персоналізованих консультаціях та дозволить обробляти складні або специфічні запити (щодо якості продукції, стандартизації, дотримання норм тощо). Така модель дасть змогу підвищити лояльність клієнтів, які дбають про безпеку продуктів харчування та власне здоров'я.

Гібридна модель доволі універсальна, адже може поєднувати переваги самообслуговування користувачів сайту з інструментами інтерактивної підтримки з боку компанії. Гібридна модель веб-орієнтованих систем клієнтської підтримки може бути ефективною для великих агропідприємств та агрохолдингів, оскільки сприятиме досягненню оптимізації витрат завдяки автоматизації простих запитів, надаватиме можливість оперативно обробляти складні питання через операторів та забезпечуватиме масштабованість і гнучкість.

Оскільки аграрна сфера є експортоорієнтованою галуззю, клієнти та партнери експортоорієнтованих компаній стикаються із необхідністю цілодобового доступу до служб підтримки, враховуючи різні часові пояси та мають потребу у більш високій якості сервісу й оперативному реагуванні на запити до компанії. В цьому випадку, на нашу думку, найбільш оптимальним вибором можуть бути інтерактивна або гібридна модель підтримки.

У табл. 2 наведено сценарій використання (Use Case) обробки запитів клієнтів у системі підтримки, побудованої на основі гібридної системи.

У випадку використання чат-ботів на основі генеративного штучного інтелекту деякі сценарії будуть схожими з гібридною моделлю, однак міститимуть додаткові етапи, пов'язані із навчанням моделі чат-боту та вдосконаленням системи.

Алгоритм використання чат-ботів на основі штучного інтелекту в системах підтримки користувачів:

- ініціалізація взаємодії із користувачем шляхом відкриття чат-боту та вибору категорії запити;
- збір чат-ботом інформації про запит, аналіз тексту запити за допомогою алгоритмів обробки природньої мови, пошук проблем на основі ключових слів;
- пошук чат-ботом релевантної відповіді у базі знань та надання її користувачу;
- уточнення запити (за потреби);
- переадресування до живого оператора (за потреби);
- взаємодія користувача із живим оператором (сценарій, представлений в табл. 2);
- завершення сесії, обробка даних сесії і навчання чат-боту на основі зворотного зв'язку;
- формування звітів про запити користувачів, проведення аналітики та розробка і реалізація заходів з оптимізації системи (вдосконалення розділу FAQ, роботи операторів і навчання бота).

Веборієнтована система підтримки клієнтів аграрних підприємств може складатися із набору компонентів, кожен із яких виконуватиме свою роль для підтримки ефективною взаємодією між користувачами (клієнтами) та сервісом підтримки. Основу веборієнтованої системи підтримки клієнтів становитиме інтерфейс взаємодії з користувачем (розділ FAQ, інтерактивні довідники, форма для зворотного зв'язку або онлайн-чат).

Таблиця 2. Приклад сценарію використання гібридної системи підтримки клієнтів
Table 2. Example scenario for using a hybrid customer support system

Пункт сценарію	Опис	
ID	UC001	
Назва	Обслуговування запиту користувачів на основі гібридної моделі підтримки	
Актори	- користувач (User) - автоматизована система підтримки (чат-бот, FAQ) - живий оператор (співробітник колцентру або служби підтримки)	
Мета	Забезпечити користувачів швидкими та ефективними відповідями на їхні запити через автоматизовану систему з можливістю переадресації до живого оператора (агента)	
Передумови	1. Користувач має доступ до інтернет-ресурсу (через вебсайт або мобільний додаток) 2. Налаштована автоматизована система підтримки з інтеграцією до живих операторів	
Основний сценарій	1.1. Ініціалізація запиту	Користувач відкриває розділ підтримки
	1.2. Автоматизована взаємодія	Чат-бот вітає користувача, аналізує запит і дає відповідь
	1.3. Переадресація (ескалація)	Якщо проблема не вирішена, запит передається до живого оператора
	1.4. Підключення до оператора	Оператор отримує запит і починає спілкування
	1.5. Рішення проблеми	Оператор спілкується із користувачем та знаходить рішення проблеми
	1.6. Закриття запиту	Проблему вирішено, користувач оцінює якість обслуговування.
Альтернативні сценарії	2.1. Користувач знаходить відповідь у FAQ, не потребуючи подальшої взаємодії 2.2. Користувач перериває взаємодію на етапі роботи з автоматизованою системою 2.3. Живий оператор не доступний (наприклад, у неробочий час). У такому разі система пропонує залишити запит у вигляді повідомлення або електронного листа	
Постумови	1. Проблема користувача вирішена, або запит передано на подальше опрацювання 2. Усі дії та переписка з користувачем збережені в системі для аналізу та покращення процесів підтримки	

Оцінку ефективності веборієнтованих систем підтримки клієнтів можна здійснювати з використанням ключових метрик: час відповіді (Response Time), рівень задоволеності користувачів (Customer Satisfaction, CSAT), коефіцієнт дозволу без залучення людини (First Contact Resolution, FCR), коефіцієнт успішності відповіді (Response Accuracy), частота ескалації (Escalation Rate), кількість оброблених запитів (Volume of Queries Handled).

Висновки

1. У процесі дослідження було проаналізовано основні підходи та напрямки застосування систем підтримки у сільському господарстві. Визначено форми та підходи, які впливають на розвиток форм підтримки клієнтів та сільського населення в аграрній сфері.

2. Проаналізовано недоліки наявних веборієнтованих систем підтримки клієнтів, які передбачають використання найбільш поширених моделей систем підтримки клієнтів, а саме моделі самообслуговування, моделі інтерактивної підтримки, гібридної моделі. Проаналізовано сильні та слабкі сторони їх застосування. Описані основні

виклики, з якими стикаються розробники веборієнтованих систем підтримки клієнтів в аграрній сфері. Встановлено, що використання оптимальної моделі веборієнтованої системи клієнтської підтримки може покращувати якість обробки простих та складних клієнтських запитів, підвищувати їхню лояльність та зменшувати витрати і втрати на обслуговування.

Бібліографічний список

1. Lui T.-W., Piccoli G. The Effect of a Multichannel Customer Service System on Customer Service and Financial Performance. *ACM Trans. Manage. Inf. Syst.* 7, 1, 2016. Article 2. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1145/2875444>
2. Chen J.-Sh., Tsou H.-T. Performance effects of IT capability, service process innovation, and the mediating role of customer service. *J. Eng. Technol. Manag.* 2012. № 29. Pp. 71–94. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2011.09.007>
3. Brady M. K., Cronin, J. J. Customer Orientation: Effects on Customer Service Perceptions and Outcome Behaviors. *Journal of Service Research.* 2001. № 3 (3). Pp. 241–251. <https://doi.org/10.1177/109467050133005>
4. Piccoli G., Anglada, L. D., Watson R. T. Using Information Technology to Improve Customer Service:

- Evaluating the Impact of Strategic Opportunities. *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*. 2005, № 5(1). Pp. 3–26. https://doi.org/10.1300/J162v05n01_02
5. Negash S., Ryan T., Igbaria M. Quality and effectiveness in Web-based customer support systems. *Information & Management*. 2003. Vol. 40, Issue 8. Pp. 757–768. [https://doi.org/10.1016/S0378-7206\(02\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7206(02)00101-5).
6. Selber St., Johndan J., Brad M. Online Support Systems. *ACM Comput. Surv.* 1996. № 28. Pp. 197–200. 10.1145/234313.23437. URL: https://www.researchgate.net/publication/220566330_Online_Support_Systems (дата звернення: 16.02.2025).
7. Piccoli G., Brohman M., Watson R., Parasuraman A. Net-Based Customer Service Systems: Evolution and Revolution in Web Site Functionalities. *Decision Science*. 2004. Vol. 35, Issue 3. Pp. 423–455. <https://doi.org/10.1111/j.0011-7315.2004.02620.x>
8. Gorry A., Westbrook R. Once more, with feeling: Empathy and technology in customer care. *Business Horizons*. 2011. Vol. 54, Issue 2. Pp. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2010.10.003>.
9. Markovitch D., Stough R., Huang D. Consumer reactions to chatbot versus human service: An investigation in the role of outcome valence and perceived empathy. *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2024. Vol. 79. P. 103847. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.103847>.
10. Xintong Y., Yipeng X. Pathways linking expectations for AI chatbots to loyalty: A moderated mediation analysis. *Technology in Society*. 2024. Vol. 78. P. 102625. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102625>.
11. Martins De Andrade I., Tumelero C. Increasing customer service efficiency through artificial intelligence chatbot. *Revista de Gestão*. 2022. Vol. 29, Issue 3.
12. Ping N. L., Hussin A. R., Ali N. B. Constructs for Artificial Intelligence Customer Service in E-commerce, 6th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS), Johor Bahru, Malaysia, 2019. Pp. 1–6, doi: 10.1109/ICRIIS48246.2019.9073486.
13. Chaturvedi R., Verma S. Opportunities and Challenges of AI-Driven Customer Service. In: Sheth, J. N., Jain, V., Mogaji, E., Ambika, A. (eds) *Artificial Intelligence in Customer Service*. Palgrave Macmillan, Cham. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33898-4_3
14. Guerola-Navarro V., Gil-Gomez H., Oltra-Badenes R. Customer relationship management and its impact on entrepreneurial marketing: a literature review. *Int Entrep Manag J* 20, 2024. Pp. 507–547. <https://doi.org/10.1007/s11365-022-00800-x>
15. Atwell E. Customer self-service: what it is, why it's important, and how to get it right, 2024. URL: <https://www.zendesk.com/blog/customer-self-service-guide-helping-customers-help/> (дата звернення: 05.01.2024)
16. Маргіта М. В., Вітовський О. І., Давида Н. М., Савчук П. О., Цибрух А. І. Customer service system digitalization strategy. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*. 2024. № 40. С. 507–516. URL: <https://nzlubbp.org.ua/index.php/journal/article/view/1179> (дата звернення: 16.02.2025).
17. Гевко В. Л. Класифікація інформаційних систем управління взаємовідносинами з клієнтами. *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2013. Вип. 2 (9). С. 44–57.

Стаття надійшла 20.02.2025

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ RESTFUL API: АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ЗАПИТІВ І АНАЛІЗ ДАНИХ

*Павло Луб, к. т. н., Віталій Фіялковський, Любомир Чухрай, к. ф.-м. н.,
Святослав Штогрин, Вікторія Стефанишин*

*Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: pollylub@ukr.net, vitalik.fiyalkovsky@i.ua, l.chukhrai@gmail.com, sviatoslav.shtohryn@gmail.com,
viktoriastefanushun12345@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.225-231>

Луб П., Фіялковський В., Чухрай Л., Штогрин С., Стефанишин В. Моделювання продуктивності RESTful API: алгоритми обробки запитів і аналіз даних

Узагальнено позитивні сторони та негативи створення RESTful API у Back-end розробці. Проаналізовано поточний стан використання REST-архітектури у вебтехнологіях. Розглянуто актуальні підходи та інструменти для створення RESTful API, а також обґрунтовано доцільність їх застосування. Описано популярні фреймворки та середовища розробки, такі як Express.js, Django REST Framework та Spring Boot, що широко застосовуються як у стартапах, так і у великих компаніях. Наведено особливості структурування запитів, методам HTTP, стандартам побудови маршрутів та обробці даних на сервері. Акцент зроблено на RESTful API, які забезпечують простоту інтеграції, масштабованість і гнучкість у розробці клієнт-серверних застосунків. Наведено перелік ключових принципів побудови RESTful API, таких як використання методів GET, POST, PUT, DELETE, правильне оформлення відповідей сервера та стандартизація шляхів ресурсів. Підкреслено окремі обмеження REST-підходу, такі як складність підтримки надмірно великої кількості ресурсів або версіонування API. Використання розглянутих інструментів і підходів дає змогу підвищити якість серверної логіки, забезпечити стандартизований обмін даними та зменшити складність інтеграції клієнтських додатків. Охарактеризовано застосування RESTful API в сучасному вебдизайні та фреймворках, зокрема Express.js, Django REST Framework і Spring Boot. Показано, що RESTful API забезпечують ефективну взаємодію між клієнтськими та серверними застосунками, пропонуючи прості й масштабовані засоби для оброблення даних і керування ресурсами. Розглянуто приклад реалізації невеликого сервера на Node.js із використанням Express для керування списком завдань, що підтримує базові операції CRUD. Основна увага приділяється оптимізації REST-запитів через методи кешування, пагінації, фільтрації, batch-запитів, стиснення даних і асинхронну обробку. Описано методику дослідження продуктивності API на тестовому сервері з Node.js/Express та інструментами Prometheus і Grafana для моніторингу. Проведено тестування під навантаженням із генерацією стабільного потоку запитів, що дозволило оцінити вплив окремих методів оптимізації на пропускну здатність, затримки та обсяг переданих даних. Наведено результати щодо переваги асинхронних запитів та batch-операцій, які забезпечують максимальне підвищення продуктивності, тоді як кешування, пагінація, фільтрація і стиснення дають помірний ефект. Наголошено, що використання комбінованих методів оптимізації значно підвищує швидкодію та зменшує час відповіді й навантаження на сервер, що забезпечує стабільну роботу вебсервісів навіть при високій інтенсивності трафіку.

Ключові слова: RESTful API, вебсервіси, Node.js, Express.js, CRUD, оптимізація запитів, кешування, пагінація, фільтрація, batch-запити, асинхронна обробка, продуктивність.

Lub P., Fialkovskiy V., Chukhrai L., Shtohryn S., Stefanyshyn V. RESTful API performance modeling: request processing algorithms and data analysis

The text summarizes the positive and negative aspects of creating RESTful APIs in back-end development. It analyzes the current state of REST architecture usage in web technologies and examines modern approaches and tools for developing RESTful APIs, justifying their applicability. Popular frameworks and development environments, such as Express.js, Django REST Framework, and Spring Boot, which are widely used in both startups and large companies, are described. The study highlights key features such as request structuring, HTTP methods, routing standards, and server-side data handling. It emphasizes RESTful APIs for their ease of integration, scalability, and flexibility in client-server application development. The key principles of RESTful API design are outlined, including the use of the GET, POST, PUT, and DELETE methods, proper server response formatting, and standardization of resource paths. Some limitations of the REST approach are noted, such as challenges in handling a large number of resources and issues related to API versioning. The use of these tools and approaches improves the quality of server-side logic, ensures standardized data exchange, and reduces complexity in client-side integration. The application of RESTful APIs in modern web design through frameworks like Express.js, Django REST Framework, and Spring Boot is characterized. A practical example is provided of a small Node.js server using Express to

manage a task list with basic CRUD operations. The focus is on optimizing REST requests through various strategies, including caching, pagination, filtering, batch requests, data compression, and asynchronous processing. A methodology for evaluating API performance on a Node.js/Express test server, using Prometheus and Grafana for monitoring, is described. Load testing with a stable request stream allowed for the assessment of the impact of individual optimization methods on throughput, latency, and data volume. Results indicate that asynchronous requests and batch operations yield the highest performance increases, while caching, pagination, filtering, and compression offer moderate improvements. It is emphasized that utilizing combined optimization methods significantly enhances speed, reduces response time and server load, and ensures stable operation of web services, even under conditions of high traffic intensity.

Keywords: RESTful API, web services, Node.js, Express.js, CRUD, request optimization, caching, pagination, filtering, batch requests, asynchronous processing, performance.

Постановка проблеми. У сучасній веброботі спостерігається стрімке зростання кількості клієнт-серверних додатків, що вимагає створення ефективних, масштабованих та стандартизованих механізмів обміну даними між клієнтом і сервером [1; 5; 14]. Одним із найпоширеніших підходів для виконання цього завдання є використання RESTful API. Проте, незважаючи на популярність архітектури REST, розробники стикаються з низкою проблем, зокрема з необхідністю дотримання стандартів побудови API, вибору раціональних інструментів для його реалізації, забезпечення безпеки, підтримки масштабованості та гнучкості, а також із труднощами під час оброблення великої кількості ресурсів і версіонування API. Відсутність чіткої структури або порушення принципів REST може призвести до зниження ефективності системи, ускладнення інтеграції та зменшення надійності вебрішень. Це визначає актуальність розгляду питання щодо сучасних підходів до створення RESTful API, аналізу відповідних інструментів та принципів побудови ефективних серверних рішень.

Реалізація RESTful API формує можливості для підвищення ефективності процесу розробки вебрішень, забезпечуючи стандартизовану взаємодію, гнучкість та масштабованість систем. Розвиток і вдосконалення таких архітектурних рішень суттєво спрощуватиме розробку складних цифрових продуктів та підвищуватиме ефективність сучасних вебтехнологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері веброботки засвідчують актуальність використання RESTful API як основної моделі побудови клієнт-серверної взаємодії [1-3; 7; 12]. У наукових працях і публікаціях, присвячених розробці вебзастосунків, широко обговорюються принципи побудови REST-архітектури, особливості реалізації CRUD-операцій через HTTP методи, а також стандартизація обміну даними у форматах JSON та XML [4; 11; 15; 20]. Зокрема наголошується на важливості коректного проєктування маршрутизації запитів, обробки помилок, безпеки API через

механізми авторизації (OAuth 2.0, JWT) та захисту від типових атак [3]. Також підкреслюються особливі вимоги до вибору інструментів і фреймворків, серед яких Express.js для Node.js, Django REST Framework для Python і Spring Boot для Java демонструють найвищу продуктивність, гнучкість та підтримку масштабованості проєктів [13; 16; 18]. Окреме порівняння REST з альтернативними підходами, зокрема GraphQL та gRPC, дозволяє глибше оцінити переваги та недоліки RESTful API залежно від специфіки проєкту.

Постановка завдання. Наше завдання – встановити й кількісно оцінити вплив комплексних методів оптимізації запитів RESTful API на показники ефективності їх застосування у вебсервісах щодо продуктивності, стабільності та швидкості системи за високої інтенсивності трафіку.

У роботі застосовано підхід, що передбачає впровадження та тестування різних методів оптимізації RESTful API, зокрема кешування (HTTP-Cache, ETag, Redis) та оптимізації структури запитів (пагінація, фільтрація, параметризація), із подальшим аналізом їхнього впливу на продуктивність, час відгуку та навантаження на сервер.

Виклад основного матеріалу. RESTful API – це архітектурний підхід до побудови вебсервісів, що базується на принципах Representational State Transfer (REST) та передбачає стандартизовану взаємодію клієнта і сервера через протокол HTTP. Така модель забезпечує обмін даними у форматах JSON або XML, використовуючи стандартні методи HTTP (GET, POST, PUT, DELETE) для роботи з ресурсами. Завдяки цьому RESTful API є гнучким, масштабованим та широко застосовується під час створення веб- і мобільних застосунків [6; 10].

Із розвитком вебтехнологій та зростанням популярності RESTful API, створення ефективних і масштабованих серверних додатків стало важливою складовою сучасної розробки програмного забезпечення. Використання RESTful API дозволяє забезпечити стабільну та гнучку взаємодію між

клієнтами і серверами через стандартизовані методи HTTP. Однією з ключових переваг використання REST є її простота та легкість інтеграції у різноманітні проекти, що забезпечує високий рівень сумісності з іншими вебтехнологіями. RESTful API також дозволяє спростувати процеси маршрутизації запитів і обробки даних на сервері. Особливо важливим є використання сучасних фреймворків та інструментів для створення RESTful API, таких як Express.js для Node.js, Django REST Framework для Python та Spring Boot для Java. Ці інструменти забезпечують ефективність, гнучкість і зручність розробки вебсервісів, що особливо важливо для створення масштабованих і високопродуктивних серверних рішень.

Окрім того, RESTful API забезпечує безпечну взаємодію між користувачами та системами, що є критично важливим для будь-якої розробки сучасних вебдодатків. Водночас важливим аспектом при створенні RESTful API є забезпечення захисту від типових атак. Для цього використовуються механізми авторизації, такі як OAuth 2.0 і JSON Web Token (JWT), що дозволяють забезпечити доступ тільки авторизованим користувачам та зберегти конфіденційність даних. Водночас, RESTful API дозволяє легко масштабувати і адаптувати вебсервіси до зростаючих потреб користувачів і зберігати високу продуктивність. Однією з важливих проблем, з якою стикаються розробники, є правильний вибір підходу до проектування API. Зокрема порівняння REST з альтернативними підходами, такими як GraphQL та gRPC, дозволяє вибрати оптимальне рішення для конкретного проекту.

Слід зазначити, що RESTful API, GraphQL та gRPC є доволі популярними у створенні програмних інтерфейсів для взаємодії між компонентами інформаційних систем. Водночас кожен із них орієнтований на різні класи завдань і має власні архітектурні особливості. Вибір конкретного підходу зазвичай визначається вимогами до продуктивності, гнучкості, масштабованості та характеру клієнтських застосунків. Щодо мови запитів GraphQL, то її застосовують у завданнях, де важлива гнучкість і оптимізація обміну даними між клієнтом і сервером, зокрема у складних фронтенд-застосунках та мобільних клієнтах (платформи соцмереж, маркетплейси, сервіси аналітики, адмінпанелі тощо). Основна ідея GraphQL полягає в тому, що клієнт сам визначає, які саме поля і в якій структурі він хоче отримати.

gRPC орієнтований на високопродуктивну взаємодію між сервісами, особливо в мікро-

сервісних і розподілених системах. gRPC доцільно використовувати для внутрішніх сервісів, потокової передачі даних і систем із високими вимогами до швидкодії (стрім-канали, онлайн ігри, транзакції в реальному часі, сервіси білінгу, обробки замовлень тощо). Однак gRPC є значно складнішим у написанні коду, налагодженні та усуненні помилок.

Отже, RESTful API зазвичай обирають для простих і зрозумілих вебінтерфейсів, GraphQL – для клієнтоорієнтованих систем із динамічними потребами в даних, а gRPC – для високопродуктивної взаємодії між сервісами всередині складних розподілених архітектур. Розгляд саме RESTful API є доцільним з огляду на його універсальність, зрілість та відповідність типовим вимогам більшості навчальних і прикладних ІТ-проектів. REST давно сформувався як де-факто стандарт побудови вебінтерфейсів взаємодії, тому його використання забезпечує прогнозовану архітектуру, зрозумілу логіку роботи та легкість інтеграції з іншими системами тощо.

З іншого боку, створення RESTful API є необхідним етапом у розробці сучасних вебдодатків, що сприяє підвищенню ефективності, зручності та безпеки розроблених серверних рішень [8; 17; 19]. Цей підхід забезпечує простоту інтеграції з іншими технологіями, а також можливість масштабування і адаптації до специфічних вимог кожного проекту.

Ці інструменти допомагають розробникам створювати додатки, що характеризуються як масштабованістю, так і гнучкістю, що має критичне значення для задоволення постійно зростаючих вимог сучасного програмування. Вони дозволяють писати структурований та підтримуваний код, полегшують інтеграцію та забезпечують швидке розгортання. Популярні фреймворки, такі як Express.js для Node.js, Django REST Framework для Python та Spring Boot для Java (рис.1, 2). Кожен із них має свої переваги і недоліки в контексті продуктивності, гнучкості та зручності використання.

Водночас тенденції використання RESTful API у промисловості [9; 19] свідчать про зростаючий інтерес та позитивні відгуки розробників, зокрема близько 85 % користувачів повідомляють про задоволеність від використання цих інструментів. Загальний інтерес до використання API у виробничому секторі зростає з кожним роком, спостерігається чітка тенденція до збільшення інвестицій у API-рішення для бізнес-процесів.

Отже, розробники повинні володіти навичками роботи з RESTful API, щоб залишатися конкурентоспроможними у своїй професійній діяльності. Популярність API в розробці програмного забезпечення підкреслює необхідність залучення цих технологій для досягнення успіху у прикладній сфері.

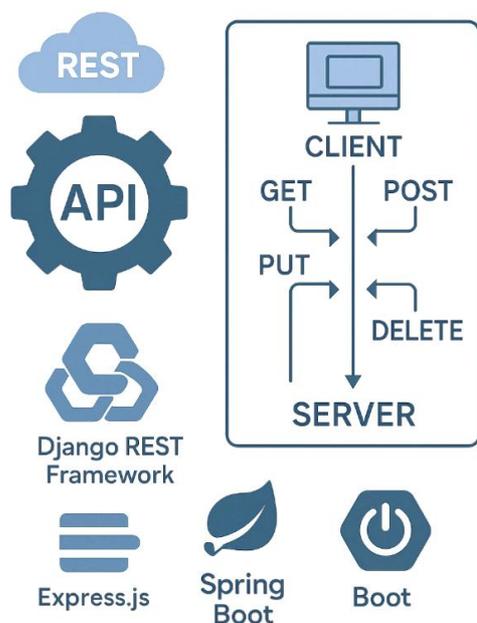


Рис. 1. Архітектура та інструменти для створення RESTful API [2]

Fig. 2. Architecture and Tools for Creating RESTful API [2]

Практика застосування RESTful API в сучасному вебдизайні, зокрема у таких рамках, як Express.js, Django REST Framework та Spring Boot, переконує в тому, що RESTful API сприяє оптимізації взаємодії між клієнтськими та серверними додатками, пропонуючи прості та масштабовані засоби для обробки даних та взаємодії. RESTful API полегшує взаємодію різних служб, гарантуючи ефективний доступ до даних, їхню генерацію, оновлення та видалення. Цей підхід також підтримує різні методи HTTP (GET, POST, PUT, DELETE), що дозволяє розробникам раціонально

```
// GET request to fetch all tasks
app.get('/tasks', (req, res) => {
  res.json(tasks);
});
```

організувати маршрути для оптимального доступу до даних та їхнього управління.

Зокрема, для прикладу створення невеликого сервера, написаного на Node.js із використанням фреймворку Express із простим завданням роботи – керувати списком справ. Доцільно розглянути й дослідити ефективність використання того чи іншого методу оптимізації запитів. Такий сервер вважається базовою реалізацією REST API, оскільки він підтримує всі основні операції: створення, отримання, оновлення та видалення даних. Каркас означеного Node.js застосунку з Express такий:

```
const express = require('express');
const app = express();
app.use(express.json());
let tasks = [
  { id: 1, name: 'Task 1', completed: false },
  { id: 2, name: 'Task 2', completed: true }
];
....
app.listen(3000, () => {
  console.log('Server running on port 3000');
});
```

Головна функція коду – створити невеликий вебсервер, який: 1) запускає застосунок Express (const app = express()); 2) дозволяє працювати з JSON-запитами (app.use(express.json())); 3) зберігає у пам'яті простий масив завдань tasks (імітація бази даних); 4) слухає порт 3000 і чекає HTTP-запитів (app.listen(3000, ...)).

Початкові дані в такому разі зберігаються у пам'яті сервера, кожна задача складається з трьох полів: 1) id – унікальний номер; 2) name – назва задачі; 3) completed – статус виконання. API працює за стандартними правилами REST і надає чотири основні маршрути:

1) отримання всіх задач (GET/tasks) – клієнт може надіслати запит, щоб отримати список справ у форматі JSON;

2) створення нової задачі (POST/tasks) – якщо потрібно додати нову справу, клієнт відправляє запит із даними у задачі JSON;

```
// POST request to create a new task
app.post('/tasks', (req, res) => {
  const newTask = req.body;
  tasks.push(newTask);
  res.status(201).json(newTask);
});
```

3) оновлення наявної задачі (PUT /tasks/:id) – для зміни назви чи статусу задачі;

4) видалення задачі (DELETE /task/:id) – якщо завдання більше не потрібне.

Швидкість опрацювання запитів у RESTful API визначає ефективність його застосування. У цьому разі до технології ставиться певний набір вимог, зокрема щодо швидкості віддачі відповіді з бази даних, синхронізування даних між клієнтом і сервером, підтримки миттєвих відповідей на запити про поточні рахунки тощо. Без оптимізації запитів навіть добре побудований сервер починає «задишатися» при збільшенні кількості клієнтів. Це формує завдання із пошуку та порівняння методів оптимізації, найефективніші для різних сценаріїв (кешування, батчинг, пагінація, асинхронні виклики тощо).

Відомо [4; 11], що до методів оптимізації REST-запитів відносять: 1) кешування – використання HTTP-заголовків (Cache-Control, ETag, Last-Modified) для зменшення кількості повторних запитів до сервера; 2) пагінацію – для великих колекцій даних (списки, таблиці) обмежують кількість результатів на один запит (HTTP-параметри: ?page=1&limit=50 – зменшує обсяг переданих даних і швидко обробляє запити); 3) фільтрацію та сортування – сервер повертає тільки потрібні поля або записи, що відповідають критеріям (GET /products?category=fruits&sort=price_desc); 4) batch-запити – об'єднання кількох операцій в один запит (у мікросервісах або при взаємодії із базою даних); 4) стиснення даних – використання gzip або brotli для зменшення об'єму переданих даних; 5) стратегії асинхронності – зменшення навантаження завдяки використанню asynchronous calls або webhooks замість постійного опитування серверу (polling).

З метою оцінки впливу окремих методів оптимізації RESTful API (кешування, підбір структури запитів, асинхронна обробка, комбіноване застосування) на продуктивність (throughput) запитів було реалізовано типовий метод дослідження. Зокрема сформовано технічну конфігурацію спеціалізованих інструментів – виділено один тестовий стенд (експериментальний сервер – Linux VM 4 vCPU, 8 GB RAM); клієнт навантаження (окрема машина, щоб уникнути локального виснаження ресурсів); локальна мережа; стек сервера Node.js/Express; база даних – mocked; Prometheus+Grafana для моніторингу й відображення трафіку/даних.

Поетапне випробування передбачало формування тестових даних. Зокрема підготовлено dataset із реалістичною розмірністю (50-200k записів списків) із очікуваними відповідями середньої довжини

JSON (розмір даних у повідомленні payload size – від 1024 до 5120 байт) в умовах однакової БД (для пагінації та фільтрації). Наступним кроком виконано генерацію навантаження із стабільним throughput (wrk2) із підтримкою стабільної швидкості запитів (constant throughput mode), яка передбачала розігрів сервера warm-up на рівні 60 с, 3 хв для кожного сценарію та серію тестів із навантаженням по 50, 100, 200 запитів/с:

```
# 200 req/s протягом 30 секунд
wrk2 -t4 -c80 -d30m -R200 http://localhost:3000/api/tasks
```

де -t – кількість потоків генератора; -c – кількість одночасних з'єднань; -d30s – тривалість тесту; -R – цільова частота запитів/с.

Отже, послідовне застосування різних методів оптимізації запитів RESTful API дозволяє ефективно управляти потоками даних, скорочує час відповіді сервера, знижує обсяг переданих даних і підвищує загальну масштабованість системи (табл.). Відповідно до отриманих показників, застосування механізмів кешування, зокрема HTTP-Cache, ETag та Redis, забезпечує суттєве зменшення навантаження на сервер приблизно на 40 % та скорочення часу відповіді повторних запитів із 240 мс до 150 мс. Оптимізація структури запитів шляхом використання пагінації, фільтрації та параметризації дозволяє зменшити обсяг переданих даних у середньому на 55 %, що, насамперед, прискорює обробку запитів на клієнтській стороні на 25-30 %.

Використання асинхронної обробки на базі Node.js і non-blocking I/O приводить до підвищення пропускної здатності системи приблизно на 60 % з 1200 до 1900 запитів за секунду та зниження середніх затримок у пікових режимах з 310 мс до 180 мс.

Найбільший ефект досягається за комбінованого застосування зазначених підходів, що забезпечує сумарне зростання загальної продуктивності системи на 50-65 % залежно від сценарію використання та підвищує її стійкість до високих навантажень.

Застосування розглянутих методів оптимізації запитів RESTful API (порівняно із варіантом – без оптимізації) дало змогу встановити межі покращення продуктивності потоків даних, котрі наведено на рис. 2.

Відповідно до отриманих результатів, асинхронні запити та batch-запити забезпечують найвищу продуктивність. За відсутності оптимізації значно знижується пропускна здатність системи. Кешування, пагінація, фільтрація та стиснення дають помірне покращення.

Таблиця. Результати оцінення впливу методів оптимізації запитів RESTful API на продуктивність потоків даних

Table. Results of evaluating the impact of RESTful API request optimization methods on data stream performance

№ з/п	Метод оптимізації	Основний ефект	Кількісний показник
1	Кешування (HTTP-Cache, ETag, Redis)	Зменшення навантаження на сервер, швидший повторний доступ	-40 % навантаження; час відповіді ↓ з 240 мс до 150 мс
2	Оптимізація структури запитів (пагінація, фільтрація, параметри)	Зменшення обсягу переданих даних, швидша обробка клієнтом	-55 % даних; обробка клієнтом швидше на 25-30 %
3	Асинхронна обробка (Node.js, non-blocking I/O)	Вища пропускна здатність, менші затримки в піку	+60 % пропускної здатності (1200 → 1900 зап/с); затримка ↓ з 310 мс до 180 мс
4	Комбіноване застосування	Сумарне підвищення продуктивності, стійкість до навантаження	Загальна продуктивність +50–65 % залежно від сценарію

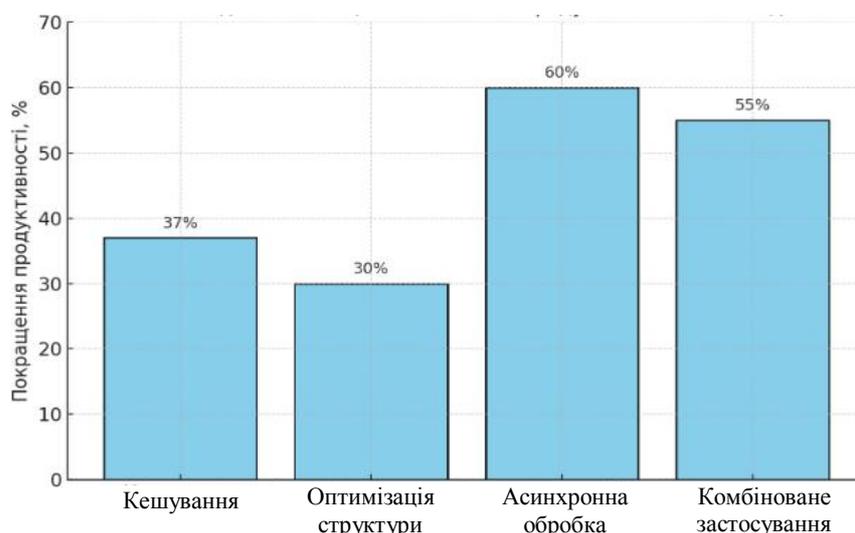


Рис. 2. Гістограма зміни впливу методів оптимізації RESTful API на продуктивність потоків даних (у порівнянні з відсутністю оптимізації запитів)

Fig. 2. Histogram of RESTful API query optimization effects on performance (compared to no optimization)

Висновки. RESTful API є базовим стандартом для побудови ефективних, масштабованих і простих у використанні вебсервісів, незважаючи на появу альтернативних технологій. Отримані результати підтверджують, що застосування комбінованих методів оптимізації RESTful API підвищує загальну продуктивність системи на 50-65 % залежно від сценарію використання. Це зменшує час відгуку, знижує серверне навантаження та підвищує стабільність роботи вебсервісів навіть за умов високої інтенсивності трафіку. Використання механізмів кешування (HTTP-Cache, ETag, Redis) дає змогу знизити середнє навантаження на сервер на 35-40 %, а середній час відповіді скорочується з 240 мс до 150 мс за повторних запитів. Оптимізація структури запитів (пагінація, фільтрація, параметризація) призводить до зменшення обсягу переданих даних у середньому на 55 %, що призводить до скорочення часу обробки на клієнтській стороні на 25-30 %. Використання асинхронної обробки (на базі Node.js та non-blocking I/O) призводить до зростання пропускної здатності системи приблизно на 60 % (з 1200 до 1900 запитів/с) та зменшення середніх затримок із 310 мс до 180 мс у пікових навантаженнях. Використання комплексних методів

таження на сервер на 35-40 %, а середній час відповіді скорочується з 240 мс до 150 мс за повторних запитів. Оптимізація структури запитів (пагінація, фільтрація, параметризація) призводить до зменшення обсягу переданих даних у середньому на 55 %, що призводить до скорочення часу обробки на клієнтській стороні на 25-30 %. Використання асинхронної обробки (на базі Node.js та non-blocking I/O) призводить до зростання пропускної здатності системи приблизно на 60 % (з 1200 до 1900 запитів/с) та зменшення середніх затримок із 310 мс до 180 мс у пікових навантаженнях. Використання комплексних методів

оптимізації RESTful API значно підвищує продуктивність системи, скорочує час відгуку, зменшує навантаження на сервер та забезпечує стабільну роботу вебсервісів навіть за високої інтенсивності трафіку. Використання механізмів кешування та оптимізація структури запитів дозволяють ефективно зменшувати обсяг переданих даних і прискорювати обробку запитів на клієнтській стороні, що загалом підвищує швидкодню та надійність системи.

Бібліографічний список

1. Архітектурні стилі API. IT-компас, 2024. URL: <https://infdev.com.ua/docs/standards/api-architecture-styles/> (дата звернення: 21.01.2025)
2. Бородкіна І. Л., Бородкін Г. О. Web-технології та Web-дизайн: застосування мови HTML для створення електронних ресурсів. Київ: Ліра-К, 2020. 212 с.
3. Бурячок В. Л., Гулак Г. М., Толубко В. Б. Інформаційний та кіберпростори: проблеми безпеки, методи та засоби боротьби. Магнолія, 2023. 448 с.
4. Гавриленко О. The System Design Cheat Sheet: API Styles - REST, GraphQL, WebSocket, Webhook, RPC/gRPC, SOAP, 2023. URL: <https://hackernoon.com/the-system-design-cheat-sheet-api-styles-rest-graphql-websocket-webhook-rpcgrpc-soap> (дата звернення: 21.01.2025)
5. Денисенко А. Вступ до REST API – RESTful вебсервіси, 2025. URL: <https://robotdreams.cc/uk/blog/466-vstup-do-rest-api-restful-vebservis/> (дата звернення: 21.01.2025)
6. Мельник Р. А. Програмування веб-застосувань (фронт-енд та бек-енд). Львів: НУ «ЛП», 2018. 248 с.
7. Скалозуб В. В., Горячкін В. М., Мурашов О. В. Реляційно-сепарабельні моделі процесів моніторингу при перемінних і нечітких інтервалах спостережень. *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. 2023. Вип. 4 (147). Дніпро, 2023. С. 3-19. DOI: 10.34185/1562-9945-4-147-2023-01
8. Тележенко Д. О. Методи та моделі синтезу архітектури віртуальних розподілених комп'ютерних систем: дис. ... канд. наук: 122 Комп'ютерні науки. Харків, 2025. 145 с.
9. Тележенко Д. О. Модифікація методу відновлення архітектури віртуальних комп'ютерних систем після збоїв. 2024. С. 274-283. DOI: 10.52058/48-2024
10. Юрчак І. Ю. Технології веб-розробки та дизайну: конспект лекцій для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 122 «Комп'ютерна наука». Львів: НУ «ЛП», 2024. 363 с.
11. Amundsen M. RESTful Web API Patterns and Practices Cookbook. Birmingham: Packt Publishing, 2013. 256 p.
12. Bayer T., Polley T. The API Gateway Handbook: Your Practical Guide to API Gateway Setup, Security, and Operation. Leanpub, 2025. URL: <https://leanpub.com/api-gateway> (дата звернення: 21.01.2025)
13. Ed-douibi H., Cánovas Izquierdo J. L., Cabot J. Automatic Generation of Test Cases for REST APIs: A Specification-Based Approach. 2018 IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC), Stockholm, Sweden, 2018. P. 181-190. DOI: 10.1109/EDOC.2018.00031
14. Konstantinov S. Mastering HTTP APIs & REST Architectural Style: From the Very Basics to the Full Professional Proficiency, 2025. URL: <https://www.amazon.com/Mastering-HTTP-APIs-Architectural-Style-ebook/dp/B0DJHNNH14> (дата звернення: 21.01.2025)
15. Mabotha E., Mabunda N. E., Ali A. et al. Exploring dynamic RESTful API implementation in IoT environments using Docker. *Sci Rep*, 2025. 15:34267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16460-0>
16. Masse M. REST API Design Rulebook. Sebastopol: O'Reilly Media, 2009. 168 p.
17. Mutiara G. A., Periyadi, Alfarisi M. R., Zain M. A., Rijali M. G., Rochim F. N. Design and implementation of a REST API-based client-server architecture for multi-sensor IoT monitoring. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2025. № 12(124). P. 426-449.
18. Prayogi A. A., Niswar M., Indrabayu I., Rijal M. Design and Implementation of REST API for Academic Information System. ResearchGate, 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/343164544_Design_and_Implementation_of_REST_API_for_Academic_Information_System (дата звернення: 21.01.2025)
19. Rodríguez C., Báez González M., Daniel F., Casati F., Trabucco J., Canali L., Percannella G. REST APIs: A Large-Scale Analysis of Compliance with Principles and Best Practices. Web Engineering. 16th International Conference, ICWE 2016, Lugano, Switzerland. Springer International Publishing, 2016. С. 21-39. DOI: 10.1007/978-3-319-38791-8_2
20. Richardson L., Ruby S. RESTful Web Services. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2007. 446 с. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/restful-web-services/9780596529260/> (дата звернення: 21.01.2025)

Стаття надійшла 25.01.2025

АЛГОРИТМІЧНІ МЕТОДИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ПРОГНОЗНОЇ АНАЛІТИКИ

*Назар Заплатинський, Віталій Фіялковський, Святослав Штогрин,
Тарас Квасниця, Андрій Татомир*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: hayk.ukr@gmail.com; vitalik.fiyalkovskyi@i.ua, sviatoslav.shtohryn@gmail.com,
taras.kvasnytsya@gmail.com andrew.tatomyr@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.232-241>

Заплатинський Н., Фіялковський В., Штогрин С., Квасниця Т., Татомир А. Алгоритмічні методи паралельної обробки великих даних у системах прогнозно-аналітики

Стрімке зростання обсягів даних та ускладнення прогнозно-аналітичних моделей зумовлюють необхідність ефективного використання паралельної обробки у сучасних інформаційних системах. Обґрунтовано алгоритмічні та архітектурні підходи до паралельної обробки великих даних у системах прогнозно-аналітики з урахуванням вимог продуктивності, масштабованості та адаптивності. Аналітично зіставлено моделі паралелізму, програмні фреймворки і обчислювальні архітектури, а також проаналізовано системні обмеження, що впливають на ефективність прогнозно-аналітичних систем у розподілених і гетерогенних середовищах. Показано, що ізольоване масштабування обчислювальних ресурсів не забезпечує пропорційного зростання продуктивності, а найвищої ефективності досягають гібридні конфігурації, які поєднують різні моделі паралелізму та апаратні прискорювачі. Наукова новизна роботи полягає в систематизації алгоритмічних і архітектурних підходів до паралельної обробки великих даних у прогнозній аналітиці з урахуванням адаптивності та системних обмежень, а також у формуванні узагальненого аналітичного підходу до поєднання програмних платформ і спеціалізованих обчислювальних архітектур. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні високопродуктивних прогнозно-аналітичних систем. Окреслено напрями подальшого розвитку паралельних прогнозно-аналітичних систем, зокрема в контексті інтеграції методів машинного навчання, потокової обробки даних і динамічного керування обчислювальними ресурсами. Особливу увагу приділено питанням узгодження алгоритмічних рішень із характеристиками апаратної платформи з метою мінімізації накладних витрат і підвищення енергоефективності обчислень. Запропонований аналітичний підхід може слугувати методологічною основою для побудови адаптивних високопродуктивних систем прогнозно-аналітики в умовах змінних навантажень і неоднорідних обчислювальних середовищ.

Ключові слова: алгоритмічні методи, прогнозна аналітика, GPU-обчислення, масштабованість, штучний інтелект, машинне навчання, розподілені обчислення.

Zaplatynskiy N., Fiyalkovskiy V., Shtohryn S., Kvasnytsia T., Tatomyr A. Algorithmic methods of parallel processing of big data in predictive analytics systems

The rapid growth of data volumes and the increasing complexity of predictive and analytical models necessitate the efficient use of parallel processing in modern information systems. The aim of this paper is to substantiate algorithmic and architectural approaches to parallel processing of big data in predictive analytics systems, taking into account performance, scalability, and adaptability requirements. The study provides an analytical comparison of parallelism models, software frameworks, and computing architectures, and examines system-level constraints that affect the efficiency of predictive analytics systems in distributed and heterogeneous environments. It is shown that isolated scaling of computational resources does not ensure proportional performance gains, whereas the highest efficiency is achieved by hybrid configurations that combine multiple parallelism models with hardware accelerators. The scientific novelty of the study lies in the systematization of algorithmic and architectural approaches to parallel big data processing in predictive analytics with consideration of adaptability and system constraints, as well as in the formulation of an integrated analytical approach to combining software platforms and specialized computing architectures. The obtained results can be applied to the design of high-performance predictive analytics systems. The article also outlines directions for the further development of parallel predictive and analytical systems, in particular in the context of integrating machine learning methods, stream data processing, and dynamic management of computational resources. Special attention is paid to aligning algorithmic solutions with the characteristics of the hardware platform to minimize overhead costs and improve the energy efficiency of computations. The proposed analytical approach can serve as a methodological basis for building adaptive high-performance predictive analytics systems under conditions of variable workloads and heterogeneous computational environments.

Keywords: algorithmic methods, predictive analytics, GPU computing, scalability, artificial intelligence, machine learning, distributed computing.

Постановка проблеми. Інтенсивне зростання обсягів даних та ускладнення прогнозно-аналітичних моделей зумовлюють необхідність використання паралельної обробки як базового механізму забезпечення продуктивності сучасних інформаційних систем. Водночас практичне впровадження паралельних алгоритмів у прогнозній аналітиці супроводжується низкою системних обмежень, пов'язаних із масштабованістю, адаптивністю обчислювальних архітектур та неоднорідністю обчислювальних середовищ.

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджена або на окремих програмних фреймворках обробки великих даних, або на спеціалізованих апаратних прискорювачах, без комплексного урахування їх взаємодії у складі прогнозно-аналітичних систем. У результаті залишається недостатньо формалізованим питання вибору та поєднання алгоритмічних і архітектурних рішень з урахуванням адаптивності, масштабованості та продуктивнісних компромісів у реальних сценаріях прогнозування.

У цьому контексті наукова проблема полягає у відсутності цілісного аналітичного підходу до оцінювання ефективності паралельної обробки великих даних у прогнозно-аналітичних системах, який би дозволяв узгоджено враховувати алгоритмічні моделі паралелізму, особливості обчислювальних архітектур та системні обмеження розподілених середовищ.

Відповідно, дослідницьке завдання дослідження полягає в обґрунтуванні та систематизації алгоритмічних і архітектурних підходів до паралельної обробки великих даних у прогнозній аналітиці з метою підвищення продуктивності, масштабованості та адаптивності таких систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері прогновної аналітики для великих даних концентруються на поєднанні архітектурних рішень та алгоритмічних методів паралельної обробки. У працях відзначено перехід від суто інфраструктурного масштабування до алгоритм-орієнтованих підходів, спрямованих на підвищення продуктивності без втрати точності [2; 4].

На системному рівні наголошено на ролі хмарних платформ, MapReduce та Spark, що забезпечують ефективне зберігання і паралельну обробку потокових та пакетних даних [1; 9]. На рівні алгоритмів перевагу мають гібридні схеми розпаралелювання та асинхронні методи синхронізації параметрів, які знижують накладні витрати [6; 7].

Дослідження на багатоядерних та GPU-системах підтверджують ефективність CUDA-орієнтованих рішень і стратегій, що поєднують *data* та *task parallelism* [3; 12]. Також відзначається значення алгоритмів, які добре масштабуються (градієнтний бустинг, розподілене SGD) та гібридних ML-підходів [15; 11].

Окремо досліджено питання безпеки і приватності у розподіленому навчанні, де інтегруються *federated learning* і методи диференційної приватності [17]. Водночас невивченими залишаються проблеми стандартів бенчмаркінгу, автоматичного вибору стратегії розпаралелювання та балансування між якістю прогнозу й ресурсними обмеженнями [4; 8].

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що проблема паралельної обробки великих даних активно досліджується у контексті окремих програмних фреймворків, алгоритмічних моделей або спеціалізованих апаратних архітектур. Водночас у більшості робіт ці підходи розглядаються ізольовано, без урахування їх взаємодії у складі прогнозно-аналітичних систем. Недостатньо висвітленими залишаються питання узгодженого вибору моделей паралелізму та обчислювальних архітектур з урахуванням адаптивності, системних обмежень і характеру прогнозних задач. Крім того, у наявних дослідженнях обмежено представлено аналітичні зіставлення, що дозволяли б оцінювати компроміси між продуктивністю, масштабованістю та енергоефективністю у гетерогенних і розподілених середовищах.

Зазначені прогалини зумовлюють необхідність комплексного аналітичного підходу до оцінювання паралельної обробки великих даних у прогнозно-аналітичних системах, що й визначає напрям і зміст дослідження.

Постановка завдання. Наше завдання – обґрунтування ефективних алгоритмічних і архітектурних підходів до паралельної обробки великих даних у прогнозно-аналітичних системах з урахуванням вимог продуктивності, масштабованості та адаптивності.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати основні моделі паралелізму (паралелізм даних, паралелізм задач, гібридні моделі) та визначити їх придатність для задач прогновної аналітики.

2. Зіставити сучасні програмні фреймворки і апаратні архітектури паралельної обробки великих даних із позицій продуктивності, масштабованості та адаптивності.

3. Виявити ключові системні обмеження паралельної обробки у розподілених і гетерогенних обчислювальних середовищах (I/O, комунікаційні накладні витрати, сублінійне масштабування).

4. Проаналізувати вплив вибору обчислювальної архітектури (CPU, GPU, TPU, FPGA, edge / fog, хмарні середовища) на продуктивність і ефективність прогнозно-аналітичних систем на основі узагальнення сучасних досліджень.

5. Сформувані узагальнені рекомендації щодо поєднання алгоритмічних і архітектурних рішень для побудови високопродуктивних прогнозно-аналітичних систем.

Виклад основного матеріалу. Паралельна обробка великих даних ґрунтується на поєднанні концепцій розподілених обчислень, багато процесорних архітектур та спеціалізованих алгоритмічних підходів, спрямованих на ефективне використання обчислювальних ресурсів. Її теоретичний фундамент становлять моделі паралелізму, що формалізують принципи розподілу завдань між незалежними виконавчими елементами. Серед ключових моделей вирізняють:

– Модель паралелізму даних (Data Parallelism), що передбачає розподіл великих масивів даних на сегменти з подальшою незалежною обробкою кожного сегмента окремим процесором або вузлом. Такий підхід типовий для задач класифікації, кластеризації та аналізу поточкових даних.

– Модель паралелізму задач (Task Parallelism), у межах якої розподіляються не дані, а різні обчислювальні функції, що можуть виконуватися одночасно. Це забезпечує підвищення продуктивності при багатоконпонентних прогнозних моделях.

– Гібридні моделі паралелізму, які поєднують обидва підходи, що особливо важливо для систем прогновної аналітики з різнорідними даними та багаторівневими алгоритмами.

На рис. 1 представлено узагальнену архітектуру системи прогновної аналітики з паралельною обробкою великих даних, яка відображає послідовність перетворення даних від джерел надходження до формування прогнозних результатів, а також взаємодію між інфраструктурним, алгоритмічним та прикладним рівнями системи.

Другим фундаментальним блоком є архітектуру обчислювальних систем, серед яких найпоширеніші:

– SIMD-архітектури (Single Instruction, Multiple Data), орієнтовані на одночасне виконання однієї інструкції над численними елементами даних. Цей підхід застосовують у графічних процесорах (GPU) для масивних паралельних обчислень.



Рис. 1. Узагальнена архітектура системи прогновної аналітики з паралельною обробкою великих даних

Fig. 1. Generalized architecture of a predictive analytics system with parallel processing of big data

– MIMD-архітектури (Multiple Instruction, Multiple Data), що дозволяють одночасне виконання різних інструкцій над різними наборами даних. Такі архітектури реалізуються у високопродуктивних кластерних та хмарних середовищах.

– SMP (Symmetric Multiprocessing) та MPP (Massively Parallel Processing) системи, які вирізняються рівнем інтеграції процесорів і масштабованістю апаратної інфраструктури.

Особливе місце у розвитку паралельної обробки посідає концепція MapReduce, запропонована компанією Google як універсальна парадигма для розподілених обчислень над великими даними. MapReduce формалізує обчислювальний процес у вигляді двох ключових функцій:

– *Map*, що розбиває початковий набір даних на пари «ключ-значення» і розподіляє їх між вузлами системи;

– *Reduce*, що агрегує результати проміжної обробки та формує кінцевий результат.

Ця концепція забезпечила підґрунтя для побудови сучасних фреймворків, зокрема Hadoop та Spark, які поєднують теоретичну простоту моделі з високим рівнем масштабованості на практиці.

Тож теоретичні основи паралельної обробки великих даних інтегрують математичні моделі паралелізму, архітектурні принципи багатопро-

цесорних систем та алгоритмічні парадигми. Вони створюють науково-методологічну базу для розробки інноваційних рішень у сфері прогнозної аналітики, де ефективність обробки безпосередньо визначає якість прогнозів і практичну значущість результатів [2; 5].

Теоретичні підходи описують архітектурні можливості паралельних систем, тоді як їхнє реальне функціонування залежить від алгоритмів, що керують розподілом даних і ресурсів. У цьому контексті важливим є аналіз алгоритмічних методів та стратегій, які дозволяють адаптувати обчислювальні процеси до специфіки великих даних і завдань прогнозної аналітики.

Ефективність сучасних систем прогнозної аналітики значною мірою визначається тим, наскільки оптимально організовано алгоритмічне керування обчислювальними процесами. Одним із ключових завдань є оптимізація розподілу навантаження, яка передбачає рівномірне розподілення обчислювальних операцій між усіма вузлами або потоками. Неefективне розподілення може призвести до дисбалансу: одні вузли простоюють, тоді як інші перевантажуються, що негативно впливає на загальну продуктивність.

Для запобігання цьому застосовують методи балансування ресурсів, які реалізуються як у вигляді статичних стратегій (де завдання попередньо фіксуються за конкретними вузлами), так і динамічних (де розподіл адаптивно змінюється залежно від стану системи та інтенсивності надходження даних). Динамічні підходи демонструють вищу

ефективність у випадках із нерегулярними або непередбачуваними потоками даних.

Окрему групу становлять алгоритми для обробки поточкових і нерегулярних даних. Поточкова аналітика потребує механізмів обробки даних у режимі реального часу з мінімальною затримкою, що досягається завдяки методам мікропакетної обробки (micro-batching) та спеціалізованим структурам даних, здатним до швидкого оновлення. Нерегулярні дані, що характеризуються високою варіативністю і непередбачуваними схемами доступу, потребують алгоритмів з адаптивною складністю та можливістю багатоваріантного розгалуження обчислювальних процедур [1; 7].

У табл. 1 систематизовано основні алгоритмічні методи та стратегії, що застосовуються у паралельній обробці великих даних у системах прогнозної аналітики. Вона демонструє взаємозв'язок між типом алгоритмічного підходу, його характеристиками та сферами практичного застосування, а також висвітлює ключові переваги й обмеження.

Аналіз свідчить, що жодна зі стратегій не є універсальною: кожна має як сильні сторони, так і обмеження, які необхідно враховувати у виборі методів для конкретних завдань прогнозної аналітики. Оптимальним підходом є комбіноване використання методів – поєднання динамічного балансування з поточковими алгоритмами та адаптивними механізмами обробки нерегулярних даних. Це дозволяє забезпечити стабільність, масштабованість і точність прогнозів у складних інформаційних середовищах [8].

Таблиця 1. Алгоритмічні методи та стратегії паралельної обробки

Table 1. Algorithmic methods and parallel processing strategies

Напрямок	Характеристика	Приклади застосування	Переваги	Обмеження
Оптимізація розподілу навантаження	Рівномірний розподіл обчислювальних задач між вузлами	Розподілені обчислювальні кластери	Зменшення часу виконання, зниження простоїв	Складність у випадку непередбачуваних потоків
Методи балансування ресурсів	Статичні та динамічні стратегії розподілу ресурсів	Хмарні сервіси, Big Data-платформи	Адаптивність до змін середовища	Потреба у складних механізмах моніторингу
Алгоритми поточної обробки	Обробка даних у реальному часі з мінімальною затримкою	FinTech, IoT, моніторинг мережевого трафіку	Висока оперативність, релевантність прогнозів	Високі вимоги до апаратних ресурсів
Алгоритми обробки нерегулярних даних	Робота з непередбачуваними структурами даних	Соціальні мережі, біоінформатика	Гнучкість, адаптивність	Зниження продуктивності при великих обсягах

Алгоритмічні методи задають логіку й ефективність паралельної обробки, однак їхня практична реалізація можлива лише за наявності відповідних платформ і систем. Саме вони створюють середовище, у якому обчислювальні процеси набувають масштабованості, стійкості та здатності працювати з гетерогенними потоками даних [4, с. 194].

Серед провідних технологій у цій сфері варто виокремити *Hadoop*, який заклав основу сучасної екосистеми Big Data завдяки реалізації парадигми *MapReduce* та розподіленого файлового сховища (HDFS). Відповідно до результатів практичних досліджень застосування *Hadoop* у розподілених середовищах [9], його головною перевагою є здатність до зберігання та обробки величезних обсягів даних у кластерах із тисяч вузлів, тоді як продуктивність у режимах реального часу залишається обмеженою.

Згідно з результатами експериментальних досліджень продуктивності розподілених систем [16], *Apache Spark* поєднує розподілену обробку з механізмом *in-memory computing*, що значно зменшує затримки та робить його ефективним інструментом для потокової аналітики, машинного навчання і побудови прогнозних моделей.

Як показано в експериментальних порівняльних дослідженнях потокових фреймворків [14; 16], *Apache Flink* здатний забезпечувати безперервний аналіз потоків завдяки низькій латентності та підтримці складних обчислювальних графіків, що є критично важливим для прогнозової аналітики у реальному часі.

Окремий напрям становлять GPU-обчислення, де графічні процесори виконують масивні паралельні операції, особливо ефективні для навчання нейронних мереж та глибинної аналітики. Їхнє використання значно прискорює роботу з багатовимірними прогнозними моделями, однак потребує спеціалізованих бібліотек і високих енергетичних витрат.

Нарешті, *хмарні сервіси (AWS, Azure, Google Cloud)* забезпечують динамічну масштабованість і доступність інструментів для прогнозової аналітики, інтегруючи *Hadoop*-, *Spark*- і *Flink*-кластери з готовими сервісами машинного навчання та аналітичними модулями.

У табл. 2 відображено найбільш поширені платформи та технології, що застосовуються для реалізації паралельної обробки у прогнозній аналітиці. Вона дозволяє порівняти їхні ключові характеристики, переваги та обмеження, а також визначити оптимальні сфери використання.

Таблиця 2. Системи та платформи прогнозової аналітики

Table 2. Predictive analytics systems and platforms

Платформа / технологія	Ключові характеристики	Переваги	Обмеження (адаптивність)	Типові сфери застосування
Hadoop	MapReduce + HDFS, пакетна обробка	Масштабованість, відмовостійкість	Висока латентність, низька адаптивність до real-time	Архіви даних, пакетна аналітика
Apache Spark	In-memory computing, підтримка MLlib	Висока швидкодія, ефективність для ML	Вимоги до RAM, адаптивність залежить від конфігурації	Потокова аналітика, прогнозування
Apache Flink	Потокова обробка у реальному часі	Низька латентність	Висока системна адаптивність, складність налаштування	IoT, фінансовий моніторинг
GPU-обчислення	Масивний паралелізм (SIMD)	Значне прискорення ML / DL	Обмежена алгоритмічна адаптивність, високі енергозатрати	Глибинне навчання
TPU	Апаратна оптимізація тензорних операцій	Висока продуктивність та енергоефективність	Низька універсальність, жорстка спеціалізація	Масштабне навчання нейромереж
FPGA	Реконфігурована апаратна логіка	Висока енергоефективність, апаратна адаптивність	Складність програмування, високі інженерні вимоги	Спеціалізовані прогнозні системи
Edge / Fog computing	Обробка даних на периферії мережі	Мінімальна латентність, висока адаптивність до контексту	Обмежені обчислювальні ресурси	IoT, промислова аналітика, кіберфізичні системи
Хмарні сервіси (AWS, Azure, GCP)	Інтеграція Big Data та ML	Гнучка масштабованість	Залежність від провайдера	Бізнес-аналітика, SaaS

Зіставлення характеристик, наведених у табл. 2, свідчить, що платформи та апаратні архітектури, які застосовуються у системах прогнозно-аналітики, суттєво відрізняються за рівнем адаптивності та характером паралельної обробки. Програмні платформи типу Hadoop, Spark і Flink забезпечують адаптивність переважно на інфраструктурному та системному рівнях за рахунок динамічного розподілу ресурсів і масштабування, тоді як апаратні прискорювачі реалізують адаптивність на рівні обчислювальної архітектури. Зокрема TPU орієнтовані на високопродуктивне виконання тензорних операцій у задачах глибинного навчання, що забезпечує високу швидкість за умови обмеженої алгоритмічної гнучкості. Натомість FPGA характерні можливістю апаратної реконфігурації, що дозволяє адаптувати обчислювальні структури під конкретні алгоритми прогнозно-аналітики та вимоги до енергоефективності. Отож, результати зіставлення підтверджують доцільність комбінування програмних платформ і спеціалізованих апаратних архітектур для досягнення балансу між продуктивністю, масштабованістю та адаптивністю систем прогнозно-аналітики [9; 16].

Аналіз продуктивності сучасних фреймворків паралельної обробки великих даних показує суттєві відмінності у часових та обчислювальних характеристиках залежно від обраної архітектури та типу навантаження. Зокрема результати опублікованих досліджень свідчать, що Apache Spark за рахунок in-memo обробки забезпечує прискорення виконання ітеративних аналітичних задач у 3–10 разів порівняно з класичною реалізацією MapReduce у Hadoop, особливо в задачах машинного навчання та прогнозування [9; 14]. Для потокових сценаріїв Apache Flink демонструє середню латентність на рівні десятків мілісекунд, що є критично важливим для фінансового моніторингу та IoT-аналітики, тоді як Spark Streaming працює з латентністю близько сотень мілісекунд.

Використання апаратних прискорювачів суттєво підвищує продуктивність навчання прогнозних моделей. Зокрема застосування GPU-обчислень у задачах глибинного навчання дозволяє скоротити час тренування моделей у 5–20 разів порівняно з CPU-кластерами аналогічної конфігурації, тоді як TPU забезпечують додаткове підвищення продуктивності для тензорних операцій за рахунок апаратної спеціалізації [3; 12]. У свою чергу, використання FPGA демонструє вигравш у продуктивності та енергоефективності у спеці-

лізованих сценаріях прогнозно-аналітики, де обчислювальні графи можуть бути адаптовані під конкретні алгоритми.

Отже, наведені числові приклади підтверджують, що вибір фреймворку та апаратної архітектури безпосередньо впливає на продуктивність прогнозно-аналітичних систем. Найвищі показники досягаються у гібридних конфігураціях, що поєднують програмні платформи обробки великих даних із спеціалізованими апаратними прискорювачами, забезпечуючи баланс між швидкістю, масштабованістю та економічною доцільністю.

Важливо зазначити, що зі зростанням обсягів даних у системах прогнозно-аналітики виникає фундаментальна проблема: масштабування не гарантує лінійного зростання продуктивності. Теоретично розподілена обробка передбачає, що збільшення кількості вузлів у кластері має пропорційно зменшувати час виконання обчислень. Подібний ефект сублінійної масштабованості зафіксовано в експериментальних дослідженнях розподілених обчислювальних систем [13; 15], де додавання ресурсів призводить до зростання накладних витрат на комунікацію, синхронізацію та управління даними.

При переході від гігабайтного до петабайтного масштабу обробки даних з'являються такі ефекти:

6. Дисбаланс між обчисленнями та I/O-операціями. Для великих обсягів даних ключовим вузьким місцем стає не процесорна потужність, а швидкість дискових підсистем та мережевих каналів. Так, у кластерах Hadoop чи Spark значна частина часу витрачається на переміщення даних між вузлами, а не на їхню безпосередню обробку.

7. Зростання латентності при потоковій аналітиці. У системах реального часу (Apache Flink, Kafka Streams) навіть мілісекундні затримки накопичуються і призводять до зсуву прогнозних моделей, що особливо критично у фінансових або медичних застосуваннях.

8. Ефект «data skew» (нерівномірний розподіл даних). У разі нерівномірної сегментації даних частина вузлів обробляє значно більший обсяг, що знижує ефективність паралельності та подовжує загальний час виконання завдання.

Для ілюстрації впливу масштабування на продуктивність наведено залежність прискорення обробки $S(N)$ від кількості вузлів кластера (рис. 2). Графік демонструє сублінійний характер масштабування: зі зростанням N приріст продуктивності зберігається, однак ефективність використання

додаткових ресурсів поступово знижується через накладні витрати на комунікацію, синхронізацію та переміщення даних між вузлами. Це узгоджується з практикою побудови прогнозно-аналітичних систем, де після досягнення певного масштабу інфраструктури вузькими місцями стають мережеві та I/O-ресурси, а також дисбаланс розподілу даних (data skew). Отже, досягнення приросту продуктивності зі збільшенням кількості вузлів потребує не лише додавання обчислювальних ресурсів, а й оптимізації алгоритмів планування, забезпечення data locality та зменшення синхронізаційних бар'єрів.

Навіть при використанні гібридних інфраструктур (CPU+GPU, локальні кластери + хмари) існують фізичні межі масштабованості:

1. Пропускна здатність мережі не зростає пропорційно кількості вузлів. У масштабах понад 1000 серверів мережеві колізії та перевантаження комутаторів стають критичними.

2. Обмеження оперативної пам'яті призводить до вимушеного використання swar-операцій, що кратно знижує продуктивність у задачах in-memory computing (наприклад, у Spark MLlib).

3. Енергетичні бар'єри: для GPU-ферм характерне надмірне споживання енергії (сотні кВт/год на кластер), що робить безконтрольне масштабування економічно та екологічно нерациональним [12; 13].

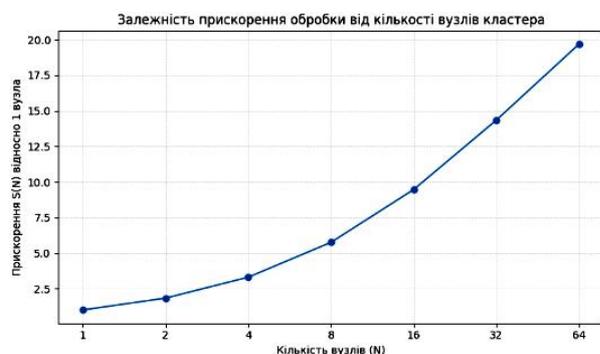


Рис. 2. Залежність прискорення обробки від кількості вузлів кластера

Fig. 2. Dependence of processing speedup on the number of cluster nodes

Примітка: $S(N)$ – прискорення відносно одного вузла

Подолання зазначених проблем можливе через багаторівневі оптимізаційні стратегії, що охоплюють алгоритмічний, інфраструктурний та системний рівні. На алгоритмічному рівні важливим напрямом є використання асинхронних методів обчислень, зокрема підходів на основі

asynchronous SGD та parameter server architecture, які знижують залежність від глобальної синхронізації та забезпечують стійкість до затримок у розподілених середовищах. Не менш перспективним є застосування апроксимаційних алгоритмів та методів sketching, що дозволяють аналізувати великі масиви даних із прийнятним рівнем статистичної точності без необхідності повного їхнього опрацювання, що суттєво скорочує часові витрати.

На інфраструктурному рівні ключову роль відіграє data locality-aware scheduling, коли завдання спрямовуються на ті обчислювальні вузли, які зберігають локальні копії даних. Це дає змогу мінімізувати обсяг мережевих комунікацій і підвищити ефективність розподіленої обробки. Додаткові можливості відкриває використання гетерогенних обчислювальних середовищ, що поєднують CPU, GPU та FPGA. Такий підхід дозволяє адаптивно розподіляти завдання відповідно до архітектурної оптимальності, наприклад, передаючи матричні операції на GPU, тоді як нерегулярні обчислення ефективніше виконуються на CPU.

На системному рівні доцільне застосування методів кешування проміжних результатів, наприклад, у середовищі Apache Spark (через механізми persist / cache), що дає змогу уникати повторних обчислень при багатократному зверненні до одних і тих самих даних. Важливим засобом оптимізації також є використання колонарних форматів збереження (Parquet, ORC), які знижують I/O-навантаження при вибіркового доступі до даних завдяки більш ефективному стисненню та організації структур. У хмарних середовищах до цього додається можливість автоматизованого масштабування ресурсів, включно з autoscaling та serverless computing, що дозволяє системі адаптувати кількість обчислювальних потужностей до поточного навантаження та забезпечує економічну ефективність [15, с. 779].

Отже, проблема масштабованості у прогнозній аналітиці не є виключно технічним викликом. Вона вимагає комплексного підходу, що поєднує оптимізацію алгоритмів, удосконалення архітектури інфраструктури та адаптивні моделі використання ресурсів. Ефективність таких систем визначається не так обсягом доступної апаратної потужності, як якістю інженерних рішень у сфері розподілених обчислень.

Попри значні зусилля, спрямовані на оптимізацію масштабованості та продуктивності систем

прогнозної аналітики, ключовим індикатором їхньої практичної цінності залишається не швидкодія сама по собі, а *якість одержуваних прогнозів*. Ефективність алгоритмів паралельної обробки даних безпосередньо корелює з точністю побудованих моделей, оскільки саме спосіб організації обчислень визначає рівень втрат інформації, швидкість ітераційного навчання та стійкість моделей до шумів у даних. Отож, між продуктивністю інфраструктури та результативністю прогнозної аналітики – складний взаємозв'язок, який не зводиться до лінійної залежності.

З одного боку, збільшення пропускної здатності та зменшення латентності системи забезпечує можливість багаторазового тренування моделей на великих обсягах даних, що підвищує статистичну значущість і робастність результатів. Наприклад, використання in-методу обчислень у Spark чи GPU-акселерації дозволяє проводити ітеративне навчання моделей у реальному часі, зменшуючи ризик недоадаптації або втрати релевантності прогнозу. З іншого боку, надмірна оптимізація у бік швидкодії може призвести до застосування апроксимативних методів обробки (sketching, sampling, approximate query processing), що, хоча й знижує часові витрати, водночас спричиняє деградацію точності прогнозних моделей, особливо в контексті складних нелінійних залежностей [6, с. 581].

Критичним аспектом є також стійкість моделей до розподілених похибок, що виникають у процесі паралельних обчислень. Синхронізаційні збої, втрати пакетів у мережі чи асинхронне оновлення параметрів у нейронних мережах можуть призвести до виникнення *parameter staleness*, який знижує збіжність алгоритмів оптимізації. У цьому контексті продуктивність системи набуває не лише кількісного, а й якісного виміру: правильна архітектура обчислювального процесу прямо впливає на метричні показники моделей (MAE, RMSE, AUC-ROC тощо) [10, с. 1525].

Отже, у прогнозній аналітиці алгоритмічна ефективність паралельної обробки даних постає не самоціллю, а інструментом підвищення точності прогнозів. Справжня оптимізація полягає у досягненні балансу між продуктивністю інфраструктури та достовірністю результатів моделювання. Це передбачає інтеграцію методів апаратного прискорення, алгоритмічних оптимізацій і статистично обґрунтованих процедур перевірки моделей, які спільно забезпечують стійкість і надійність прогнозної аналітики в умовах обробки великих даних.

Встановлений взаємозв'язок між продуктивністю паралельних обчислень та точністю прог-

нозних моделей набуває особливого значення тоді, коли результати аналітики застосовуються у конкретних прикладних сферах. Адже саме від стабільності обчислювальної інфраструктури та алгоритмічної ефективності залежить здатність системи забезпечити своєчасні та достовірні прогнози, що у практичних умовах трансформуються у фінансові виграші, зниження ризиків або оптимізацію управлінських рішень. Логічним наступним кроком є розгляд практичних сценаріїв застосування алгоритмічних методів паралельної обробки у прогнозній аналітиці, які демонструють реальну цінність цих технологій.

Зокрема у сфері фінансової аналітики високопродуктивні системи дозволяють здійснювати *high-frequency trading* та моніторинг ринкових аномалій у реальному часі, забезпечуючи конкурентні переваги банків і біржових платформ. Як показано в прикладних дослідженнях прогнозування попиту та поведінки користувачів [14; 17], паралельні алгоритми дають змогу оперативного аналізувати великі обсяги транзакційних і сенсорних даних, що є критичним для ритейлу, логістики та енергетичного сектору.

У контексті аналізу поведінки користувачів масштабовані моделі дозволяють виявляти приховані закономірності у великих потоках цифрових слідів (clickstream data), що застосовується у маркетинговій персоналізації та побудові рекомендаційних систем [14]. Нарешті, у сфері управління ризиками паралельна обробка даних забезпечує виявлення системних загроз та прогнозування кризових сценаріїв у фінансових і виробничих системах, де часова затримка між обробкою та прийняттям рішень може мати критичні наслідки [17].

Тож саме прикладні кейси підтверджують, що алгоритмічна оптимізація паралельних обчислень є не лише теоретичною проблемою, а й практичною необхідністю, без якої сучасні системи прогнозної аналітики втрачають свою ефективність у реальних умовах використання.

Перспективність паралельних алгоритмічних підходів у прогнозній аналітиці визначається не лише їхньою здатністю обробляти великі масиви даних у режимі реального часу, а й потенціалом до подальшої інтеграції з методами машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI). Сучасні виклики, пов'язані зі складністю моделей та динамічністю даних, висувають вимогу переходу від суто інфраструктурних оптимізацій до когнітивно орієнтованих систем, де алгоритмічна ефективність прямо підпорядковується якості прогнозів і здатності моделей до адаптації.

Одним із ключових напрямів є впровадження *інтегративних підходів ML / AI* у розподілені системи. Використання *глибинних нейронних мереж (DNN)* у поєднанні з високопродуктивними обчислювальними платформами (GPU-кластери, TPU, FPGA) дозволяє реалізовувати масштабоване навчання моделей у режимі *distributed deep learning*. Прикладом є архітектури на основі *parameter server* чи *ring-allreduce*, які забезпечують ефективне узгодження параметрів між тисячами обчислювальних вузлів. Це відкриває можливості побудови прогнозних моделей нового покоління, здатних виявляти приховані нелінійні закономірності у даних високої розмірності [3, с. 1849].

Іншим перспективним вектором є розвиток гібридних підходів до обробки, що поєднують різні парадигми паралельних обчислень. Наприклад, інтеграція *batch-орієнтованих технологій (Spark, Hadoop)* із системами *streaming-аналітики (Flink, Kafka Streams)* формує середовище *lambda-макарра-архітектур*, де ретроспективний аналіз поєднується з оперативним прогнозуванням. У такий спосіб система зберігає баланс між високою точністю та низькою латентністю. Додаткові можливості забезпечує *federated learning*, що дозволяє здійснювати колективне навчання моделей без централізованого збирання даних, підвищуючи як масштабованість, так і безпекові аспекти прогнозної аналітики.

Отже, отримані результати та проведені аналізи дозволяють окреслити конкретні напрями подальшого розвитку алгоритмічних і архітектурних рішень у системах прогнозної аналітики. Зокрема актуальне дослідження адаптивних алгоритмів паралельної обробки, здатних динамічно змінювати стратегії розподілу обчислень залежно від характеристик даних і поточного навантаження. Перспективним напрямом є також поглиблений аналіз гетерогенних обчислювальних середовищ із поєднанням CPU, GPU, FPGA та спеціалізованих прискорювачів з метою підвищення енергоефективності й масштабованості прогнозної аналітичних систем. Особливої уваги потребують питання оптимізації масштабування у хмарних і *edge / fog* середовищах з урахуванням обмежень латентності та пропускної здатності мережі. Подальший розвиток тематики пов'язаний із експериментальною валідацією запропонованих підходів на реальних наборах даних та аналізом компромісів між точністю прогнозування й обчислювальними витратами, що дозволить сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо проектування високопродуктивних прогнозних аналітичних систем, а також уточнити межі їх ефективного

застосування в умовах масштабних і динамічних обчислювальних середовищ.

Висновки. У дослідженні розглянуто проблему підвищення ефективності паралельної обробки великих даних у прогнозно-аналітичних системах в умовах зростання обсягів інформації, ускладнення алгоритмічних моделей і неоднорідності обчислювальних середовищ. Дослідження спрямоване на узгоджений аналіз алгоритмічних і архітектурних підходів, що визначають продуктивність, масштабованість та адаптивність таких систем.

У межах виконання поставлених завдань проаналізовано основні моделі паралелізму (паралелізм даних, паралелізм задач і гібридні моделі) та обґрунтовано їх придатність для завдань прогнозної аналітики залежно від типу даних і характеру обчислень. Зіставлено сучасні програмні фреймворки і апаратні архітектури паралельної обробки великих даних, що дозволило виявити їхні функціональні відмінності, рівні адаптивності та обмеження у контексті прогнозної аналітичних застосувань.

На основі узагальнення результатів сучасних досліджень проаналізовано вплив вибору обчислювальної архітектури (CPU, GPU, TPU, FPGA, *edge / fog* і хмарні середовища) на продуктивність і ефективність прогнозних аналітичних систем. Показано, що використання гетерогенних та гібридних конфігурацій дозволяє досягти кращого балансу між швидкодією, масштабованістю та енергоефективністю порівняно з ізольованим застосуванням окремих архітектур. Особливу увагу приділено аналізу системних обмежень паралельної обробки у розподілених середовищах, зокрема сублінійній масштабованості, накладним витратам на комунікацію, I/O-операціям та ефекту нерівномірного розподілу даних. Наведена емпірична ілюстрація залежності продуктивності від кількості обчислювальних вузлів підтверджує, що напруження ресурсів без урахування системних факторів не забезпечує пропорційного зростання швидкодії.

Узагальнення наведених у статті числових показників свідчить, що застосування *in-memory* обробки в Apache Spark забезпечує прискорення ітеративних аналітичних та прогнозних задач у середньому у 3–10 разів порівняно з класичною реалізацією MapReduce у Hadoop. Використання апаратних прискорювачів у задачах глибинного навчання дозволяє скоротити час тренування моделей у 5–20 разів при переході від CPU-орієнтованих конфігурацій до GPU-рішень, тоді як TPU демонструють додатковий виграв у тензор-

них операціях за рахунок апаратної спеціалізації. Водночас збільшення кількості обчислювальних вузлів у кластерах супроводжується сублінійним зростанням продуктивності, що підтверджує необхідність алгоритмічної оптимізації та адаптивного керування ресурсами замість простого нарощування інфраструктури.

Наукова новизна роботи полягає в систематизації алгоритмічних і архітектурних підходів до паралельної обробки великих даних у прогностичній аналітиці з урахуванням адаптивності, масштабованості та системних обмежень, а також у формуванні узагальненого аналітичного підходу до поєднання програмних платформ і спеціалізованих апаратних прискорювачів у складі прогностично-аналітичних систем.

Отримані результати підтверджують виконання поставленого у статті дослідницького завдання та можуть бути використані як теоретико-методична основа для проєктування і оптимізації високопродуктивних прогностично-аналітичних систем, орієнтованих на роботу з великими та динамічними наборами даних.

Бібліографічний список

1. Bu L., Zhang H., Xing H., Wu L. Research on parallel data processing of data mining platform in the background of cloud computing. *Journal of Intelligent Systems*. 2021. Vol. 30. P. 479–486. DOI: 10.1515 / jisys – 2020–0113.
2. Dritsas E., Trigka M. Exploring the Intersection of Machine Learning and Big Data: A Survey. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 13. DOI: 10.3390 / make7010013.
3. Ghimire A., Amsaad F. A Parallel Approach to Enhance the Performance of Supervised Machine Learning Realized in a Multicore Environment. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2024. Vol. 6, No. 3. P. 1840–1856. DOI: 10.3390 / make6030090.
4. Jamarani A., Haddadi S., Sarvizadeh R. et al. Big data and predictive analytics: A systematic review of applications. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. P. 176–253. DOI: 10.1007 / s10462–024–10811–5.
5. Kolisetty V. V., Rajput, D. S. A review on the significance of machine learning for data analysis in big data. *Jordanian Journal of Computer and Information Technology (JJCIT)*. 2020. Vol. 6. P. 155–171.
6. Laouni D. Dynamic Distributed and Parallel Machine Learning algorithms for big data mining processing. *Data Technologies and Applications*. 2021. No. 4. P. 558–601. DOI: 10.1108 / dta – 06–2021–0153.
7. Laouni D., Bensaber D. A., Adjoudj R. Big Data analytics for prediction: parallel processing of the big learning base with the possibility of improving the final result of the prediction. *Information Discovery and Delivery*. 2018. Vol. 46, No. 2. P. 147–160. DOI: 10.1108 / IDD–02–2018–0002.
8. Naeem M., Jamal T., Diaz-Martinez J., Butt S. A., Montesano N., Tariq M. I., De-la Hoz-Franco E., De-La-Hoz-Valdiris E. Trends and future perspective challenges in big data. *Advances in Intelligent Data Analysis and Applications: Proceedings of the Sixth Euro-China Conference on Intelligent Data Analysis and Applications* (Arad, Romania, 15–18 October 2019). Berlin / Heidelberg: Springer, 2022. P. 309–325.
9. Natesan P., Sathishkumar V. E., Mathivanan S., Venkatesan V., Maheshwari J., Jayagopal P., Shaikh Muhammad A. A Distributed Framework for Predictive Analytics Using Big Data and MapReduce Parallel Programming. *Mathematical Problems in Engineering*. 2023. Article ID 6048891. 10 p. DOI: 10.1155 / 2023 / 604889.
10. Oo M. C. M., Thein T. An efficient predictive analytics system for high dimensional big data. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34. P. 1521–1532. DOI: 10.1016 / j. jksuci. 2019.09.001.
11. Raghavendra S. Scalability of Data Science Algorithms: Empowering Big Data Analytics. *Journal of Artificial Intelligence and Computing Techniques*. 2024. Vol. 1. P. 1–9.
12. Rakhimov M., Ochilov M., Javliev S., Nasimov R. Analysis and Possibilities of Parallel Approach in Big Data Processing. *ICFNDS '24: Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems*. 2024. P. 20–25. DOI: 10.1145 / 3726122.3726126.
13. Rakhimov M., Zaripova D., Javliev S., Karimberdiyev J. Deep learning parallel approach using CUDA technology. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3244, No. 1. 11 p. DOI: 10.1063 / 5.0241439.
14. Silva J., Hernández Palma H., Niebles Núñez W., Ovallos-Gazabon D. Parallel Algorithm for Reduction of Data Processing Time in Big Data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1432, No. 1. 10 p. DOI: 10.1088 / 1742–6596 / 1432 / 1 / 012095.
15. Tamilselvan K., M. N. S., Saranya A., Abdul Jaleel D., Rajani Kanth T. V., Govardhan S. D. Optimizing data processing in big data systems using hybrid machine learning techniques. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2025. Vol. 11, No. 1. P. 775–782. DOI: 10.22399 / ijcesen. 9361.
16. Tyagi A. K., G. R. Machine learning with big data. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology and Management (SUSCOM)* (Amity University Rajasthan, Jaipur, India, 26–28 February 2019). Jaipur: Amity University Rajasthan, 2019.
17. Xu R., Baracaldo N., Joshi J. Privacy-preserving machine learning: Methods, challenges and directions. *arXiv preprint*. 2021. arXiv: 2108.04417.

Стаття надійшла 20.02.2025

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОТИРИЗИКОВОГО УПРАВЛІННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСАМИ В ІНЖИНІРИНГОВИХ КОМПАНІЯХ «7S+R»

Федір Ткаченко, аспірант

*Черкаський державний технологічний університет,
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, Черкаська область, Україна,
e-mail: tkachenko.f8@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.242-248>

Ткаченко Ф. Концептуальна модель протиризикового управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях «7S+R»

Стаття присвячена розробці концептуальної моделі протиризикового управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях «7S+R», яка базується на класичній моделі McKinsey 7S та інтегрує управління ризиками як наскрізний елемент організаційної системи. У сучасному динамічному та високоневизначеному бізнес-середовищі інжинірингові компанії функціонують у складних умовах, що характеризуються високою технологічною складністю проєктів, значними інвестиціями, багаторівневою кооперацією із субпідрядниками та жорсткими регуляторними вимогами. Це зумовлює наявність стратегічних, операційних, фінансових, кадрових та проєктних ризиків, які безпосередньо впливають на стабільність і результативність бізнес-процесів.

Наявні фреймворки управління ризиками, зокрема ISO 31000, COSO ERM та PMBOK, формують загальну логіку і принципи ризик-менеджменту, однак не забезпечують необхідної деталізації на рівні конкретних організаційних елементів і не дозволяють ідентифікувати джерела ризиків у структурі бізнес-процесів. Водночас модель McKinsey 7S, яка широко використовується для організаційної діагностики, фокусується на внутрішній узгодженості компанії, але не враховує ризики як системний фактор управління.

Запропонована модель «7S+R» усуває цю прогалину шляхом інтеграції елемента Risk у всі сім складових організації – стратегію, структуру, системи, спільні цінності, стиль управління, персонал і компетенції. Ризик розглядається не як окремий об'єкт управління, а як багатовимірна характеристика, що пронизує кожен елемент моделі та формує його стійкість до зовнішніх і внутрішніх загроз. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного управління ризиками до системної протиризикової архітектури бізнес-процесів.

Практична цінність моделі полягає в можливості її застосування для комплексної організаційної діагностики, підтримки стратегічних і операційних управлінських рішень, а також для формування програм трансформації та підвищення адаптивності інжинірингових компаній в умовах нестабільного та ризиконасиченого середовища

Ключові слова: бізнес-процеси, управління бізнес-процесами, управління ризиками, інжинірингові компанії.

Tkachenko F. Conceptual model of risk-oriented business process management in 7S+R engineering companies

The article is devoted to the development of a conceptual model of risk-oriented business process management in engineering companies entitled 7S+R, which is based on the classical McKinsey 7S framework and integrates risk management as a cross-cutting element of the organizational system. In today's dynamic and highly uncertain business environment, engineering companies operate under complicated conditions characterized by high technological complexity of projects, significant investment volumes, multi-level cooperation with subcontractors, and strict regulatory requirements. This leads to the emergence of strategic, operational, financial, human resource, and project risks that directly affect the stability and performance of business processes.

Existing risk management frameworks, including ISO 31000, COSO ERM, and PMBOK, establish general principles and logic of risk management. However, they do not provide sufficient granularity at the level of specific organizational elements and do not allow for the identification of risk sources within the structure of business processes. At the same time, the McKinsey 7S model, which is widely used for organizational diagnostics, focuses on internal organizational alignment but does not explicitly incorporate risks as a systemic management factor.

The proposed 7S+R model addresses this gap by integrating the Risk component into all seven organizational elements - strategy, structure, systems, shared values, management style, staff, and skills. Risk is treated not as a separate management object, but as a multidimensional characteristic that permeates each element of the model and determines its resilience to internal and external threats. This approach makes it possible to move from fragmented risk management toward a comprehensive risk-oriented architecture of business processes.

The practical value of the model lies in its applicability for comprehensive organizational diagnostics, support of strategic and operational managerial decisions, as well as for designing transformation programs and increasing the adaptability of engineering companies in volatile and risk-intensive environments.

Keywords: business processes, business process management, risk management, engineering companies.

Постановка проблеми. Останніми роками все більше підприємств та організацій, зокрема інжинірингових компаній, приділяють увагу управлінню ризиками під час оптимізації бізнес-процесів. В умовах посиленої конкуренції, особливо у сферах технологічного виробництва та проектної діяльності, виникає нагальна потреба інтегрувати системний підхід до управління ризиками на всіх рівнях організації. У цьому контексті важлива можливість розширення класичної моделі McKinsey 7S, яка традиційно використовується для оцінки стану організацій та розробки стратегій змін.

Традиційні підходи до управління, що зосереджуються переважно на стратегії та організаційній структурі, недостатні для проактивної ідентифікації та мінімізації загроз у динамічному бізнес-середовищі. Враховуючи, що ризики можуть виникати в будь-якій сфері функціонування організації, від фінансових до кадрових, виникає нагальна потреба в інтегрованій, системній концепції, яка б дозволяла вбудовувати управління ризиками безпосередньо в усі ключові бізнес-процеси. Модель McKinsey 7S доцільно використовувати для ідентифікації ризиків, оскільки вона дозволяє розглядати бізнес-процеси не лише з позиції структури (Structure), стратегії (Strategy) та систем (Systems), а й враховуючи «м'які» чинники – стиль управління (Style), навички (Skills), персонал (Staff), спільні цінності (Shared Values). Такий підхід дозволяє краще зрозуміти взаємозв'язки між різними елементами підприємства та виявити приховані джерела ризиків, що можуть впливати на результативність бізнес-процесів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Модель McKinsey 7S – це концепція стратегічного управління, розроблена консультантами компанії McKinsey & Company у 1980-х роках. Сьогодні модель McKinsey 7S використовують для побудови та оптимізації правильних бізнес-процесів усередині підприємства. Перевага моделі (порівняно з іншими моделями оцінки мікросередовища компанії) в тому, що вона наголошує на важливості людського фактора в розвитку підприємства і розглядає його структуру не тільки з боку наявних матеріальних цінностей [1].

Ключовою особливістю моделі є те, що всі елементи взаємопов'язані між собою, тобто зміна одного з них впливає на інші. Елементи моделі поділяють на «жорсткі» та «м'які» (рис. 1). Жорсткі елементи (hard elements) легше ідентифікувати, описати та змінити. Вони зазвичай чітко задокументовані, визначені й можуть бути змінені через

управлінські рішення, організаційні інструменти або стратегії. До них відносять стратегію, структуру, системи. У свою чергу м'які елементи (soft elements) важче формалізувати, виміряти чи змінити. Вони пов'язані з корпоративною культурою, людьми та стилем лідерства, це зокрема спільні цінності, стиль, персонал, навички.



Рис. 1. Класична модель McKinsey 7S [14]

Fig. 1. The classic McKinsey model [14]

Модель McKinsey 7S допомагає організаціям аналізувати та покращувати свою ефективність, узгоджуючи сім взаємопов'язаних елементів внутрішнього середовища підприємства [4]:

1. Strategy (Стратегія) – довгостроковий план компанії щодо досягнення конкурентних переваг;
2. Structure (Структура) – організаційна структура компанії (ієрархія, розподіл відповідальності);
3. Systems (Системи) – процеси та процедури, що регулюють діяльність компанії;
4. Shared Values (Спільні цінності) – корпоративна культура, місія та цінності, які визначають поведінку працівників;
5. Style (Стиль управління) – лідерські підходи та корпоративна культура управління;
6. Staff (Персонал) – кадрова політика, розвиток та управління талантами;
7. Skills (Навички) – ключові компетенції співробітників та організації загалом.

Управління ризиками є ключовим елементом стратегічного та операційного управління в інжинірингових компаніях, які часто реалізують складні проекти в умовах високої невизначеності. Різноманітність ризиків притаманна інжиніринговим компаніям [2; 6; 11]. Визначення, оцінка та ефективне реагування на ризики дозволяють мінімізувати потенційні збитки, забезпечити стій-

кість бізнес-процесів та підвищити конкурентоспроможність компанії. На сучасному етапі розвитку ризик-менеджменту застосовують різні методи, які охоплюють як кількісні, так і якісні підходи до аналізу та обробки ризиків. Виокремимо основні методи управління ризиками відповідно до [5, 7–9]:

1. Уникнення ризику;
2. Зниження ризику;
3. Передача ризику;
4. Прийняття ризику;
5. Моніторинг і контроль ризиків;
6. Планування реагування на ризики (компенсація ризиків).

Стандарти управління ризиками є важливими орієнтирами для забезпечення структурованого, ефективного та системного підходу до управління ними. Основні міжнародні та національні стандарти в галузі управління ризиками:

1. ISO 31000:2018 – Risk Management Guidelines [16];
2. FERMA Risk Management Standard [19];
3. COSO ERM (Enterprise Risk Management) – Framework [13; 17];
4. ISO 22301 – Business Continuity Management Systems [15];
5. PMBOK (Project Management Body of Knowledge) [10; 12];
6. ONR 49000 – Risk Management for Organizations and Systems [18].

Актуальність дослідження зумовлена зростанням рівня невизначеності, складності та ризиків у діяльності інжинірингових компаній, які реалізують проекти у високотехнологічних, інвестиційно насичених та динамічних середовищах. Традиційні підходи до управління бізнес-процесами та ризиками розглядають ці аспекти переважно окремо, що ускладнює своєчасну ідентифікацію джерел загроз та знижує адаптивність організаційних систем. Тож виникає потреба у створенні інтегрованої концепції, яка поєднує управління бізнес-процесами та ризиками на рівні ключових організаційних елементів.

Постановка завдання. Наше завдання – розробка та наукове обґрунтування концептуальної моделі «7S+R» протиризикового управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Проаналізувати модель McKinsey 7S як інструмент організаційної діагностики;
2. Систематизувати підходи до управління ризиками в інжинірингових компаніях;

3. Розробити концепцію інтеграції елемента Risk у структуру моделі 7S;

4. Сформулювати модель «7S+R» та обґрунтувати її відмінність від наявних фреймворків.

Виклад основного матеріалу. Запропонована модель «7S+R» передбачає вбудовування процесу управління ризиками в усі наявні компоненти моделі 7S. Отож, ризик (Risk) розглядається не як окрема категорія, а як інтегрований аспект, що пронизує кожен з елементів організаційної системи. На рис. 2 показано запропоновану авторами концептуальну модель «7S+R». Додатковий елемент R (Risk) перетворює модель з інструменту для аналізу організаційних змін на динамічний механізм управління невизначеністю та проактивного підвищення стійкості. Замість того, щоб просто діагностувати поточний стан та виявляти невідповідності, модель «7S+R» фокусується на ідентифікації та мінімізації ризиків, що виникають у кожному із семи компонентів.

Такий підхід дозволяє інтегрувати управління ризиками безпосередньо в повсякденну діяльність та стратегічне планування, що є критично важливим для інжинірингових компаній, які працюють у динамічному середовищі.

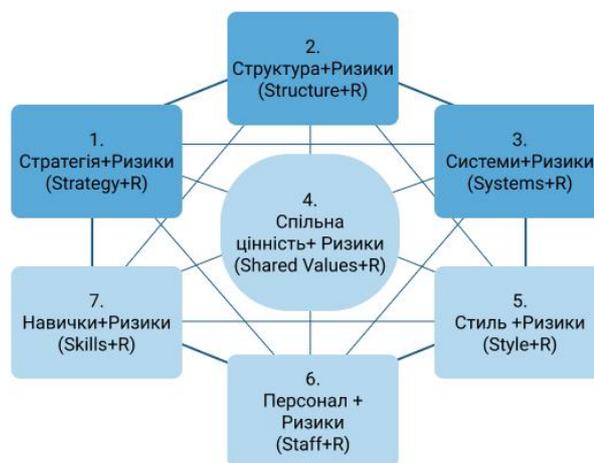


Рис. 2. Концептуальна модель управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях «7S+R»

Fig. 2. Conceptual model of business process management in 7S+R engineering companies

Основні положення моделі «7S+R» полягають у тому, що кожен із компонентів моделі 7S (Strategy, Structure, Systems, Shared Values, Style, Staff, Skills) розглядається з урахуванням ризиків, пов'язаних із його реалізацією чи функціонуванням.

1. Strategy (Стратегія): визначення ризиків, пов'язаних із реалізацією стратегії, можливістю її

неефективності, неузгодженості з ринковими умовами або внутрішніми ресурсами. Управління охоплює аналіз стратегічних ризиків і впровадження механізмів адаптації та гнучкості.

2. Structure (Структура): ідентифікація ризиків у побудові організаційної структури, таких як дублювання функцій, конфлікт повноважень або відсутність відповідальності. Оптимізація структури передбачає мінімізацію організаційних дисфункцій.

3. Systems (Системи): аналіз ризиків у внутрішніх процесах, ІТ-системах, регламентах, що регулюють операційну діяльність. Основна мета – побудова надійних систем управління, що знижують технічні, процедурні та інформаційні ризики.

4. Shared Values (Загальні цінності): виявлення ризиків, пов'язаних із невідповідністю або розмиванням корпоративних цінностей. Передбачає підсилення організаційної культури задля запобігання етичним та мотиваційним ризикам.

5. Style (Стиль управління): оцінка ризиків, що виникають унаслідок неефективного стилю лідерства або комунікацій. Управління передбачає розвиток адаптивного, прозорого та ефективного менеджменту.

6. Staff (Персонал): ризики, пов'язані з кадровими ресурсами: відтік талантів, брак компетенцій, демотивація. Передбачає впровадження політики розвитку та утримання персоналу.

7. Skills (Компетенції): ідентифікація прогалин у знаннях і вміннях, які можуть обмежити ефективність бізнес-процесів. Забезпечення безперервного навчання та розвитку для зниження ризиків, пов'язаних із недостатньою кваліфікацією.

Для кожного елемента проводять: ідентифікацію потенційних ризиків; оцінку рівня ризику; розробку заходів із мінімізації та контролю ризиків; моніторинг ефективності впроваджених змін. У центрі моделі залишаються «Спільні цінності», доповнені акцентом на формування організаційної культури управління ризиками. Приклади методів управління для ризиків за елементами моделі 7S + R та методи наведено в табл. 1.

Для детальнішого аналізу моделі «7S+R» та демонстрації її унікального позиціонування порівняємо її з двома найбільш відомими фреймворками управління ризиками: ISO 31000 та COSO ERM (Enterprise Risk Management). Результати порівняння зведемо в табл. 2.

Таблиця 1. Методи управління ризиками бізнес-процесів за елементами моделі 7S + R
Table 1. Methods of managing business process risks according to the elements of the 7S + R model

Елемент моделі McKinsey 7S	Приклад ризиків	Метод управління	Приклад використання
1	2	3	4
Strategy (Стратегія)	Ризик помилкової стратегії	Уникнення ризику	Стратегічний аудит із залученням зовнішніх експертів
	Ризик несвоєчасної адаптації	Зниження ризику	Моніторинг трендів та змін
	Ризик неправильної оцінки ринку	Передача ризику	Залучення маркетингових агентств для дослідження
	Ризик неправильного позиціонування	Зниження ризику	Проведення фокус-груп та пілотних кампаній
	Ризик неузгодженості цілей	Моніторинг і контроль	Розробка стратегічних карт (balanced scorecard)
Structure (Структура)	Ризик організаційної неефективності	Зниження ризику	Аудит структури, оптимізація процесів
	Ризик дублювання процесів	Зниження ризику	Бізнес-процесне моделювання (BPMN)
	Ризик недостатньої адаптивності	Зниження ризику	Agile, Lean управління
	Ризик надмірної централізації	Уникнення ризику	Делегування повноважень різним підрозділам
	Ризик складної ієрархії	Зниження ризику	Скорочення рівнів управління, командна робота
Systems (Системи)	Ризик збою управлінських систем	Зниження ризику	Резервне копіювання та аварійне відновлення
	Ризик відсутності стандартизованих процедур	Зниження ризику	Впровадження SOP (Standard Operating Procedures)

1	2	3	4
	Ризик залежності від застарілих ІТ-рішень	Зниження ризику	Міграція на сучасні хмарні платформи. Моніторинг та впровадження сучасних рішень
	Ризик несумісності систем	Передача ризику	Контракт на інтеграцію з ІТ-підрядником
	Ризик втрати даних	Уникнення/зниження	Хмарне резервне копіювання з багаторівневим доступом
	Ризик низької автоматизації	Зниження ризику	Впровадження ERP/CRM систем
	Ризик відсутності контролю	Моніторинг і контроль	Внутрішній аудит та контрольні точки в процесах
Shared Values (Цінності)	Ризик неузгодженості цінностей компанії	Зниження ризику	Розробка і поширення корпоративного кодексу
	Ризик втрати корпоративної культури	Зниження ризику	Тренінги, ритуали компанії, внутрішні комунікації
	Ризик байдужості до етичних стандартів	Зниження ризику	Внутрішній комплаєнс та етичні комісії
	Ризик формалізму	Зниження ризику	Створення ініціативних груп
	Ризик низької залученості	Зниження ризику	Оцінка залученості персоналу, мотиваційні програми
	Ризик зовнішнього нерозуміння	Передача ризику	Залучення PR агентств
Style (Стиль управління)	Ризик авторитарного стилю	Зниження/уникнення	Коучинг для керівників, ротація управління
	Ризик хаотичного управління	Зниження ризику	Впровадження проектного управління (PMI, PRINCE2)
	Ризик неузгодженості стилів серед керівництва	Зниження ризику	Стратегічні сесії для керівного складу
	Ризик непрозорості рішень	Зниження ризику	Розробка системи KPI, внутрішній портал управлінських рішень
	Ризик ігнорування зворотного зв'язку	Зниження ризику	Регулярні опитування співробітників, скриньки довіри
	Ризик залежності від одного лідера	Зниження ризику	Планування наступництва, розвиток керівників 2-го рівня
Staff (Персонал)	Ризик дефіциту кваліфікованих кадрів	Зниження ризику	Програми залучення молодих спеціалістів, дуальна освіта
	Ризик плинності кадрів	Зниження ризику	Програми утримання: бонуси, нематеріальні заохочення
	Ризик неефективної мотивації	Зниження ризику	Побудова системи преміювання на основі KPI
	Ризик недооцінки розвитку	Зниження ризику	Навчальні платформи, кар'єрні треки
	Ризик неузгодженості ролей	Зниження ризику	Ролі прописані в регламентах та посадових інструкціях
Skills (Навички)	Ризик технологічної некомпетентності	Зниження ризику	Сертифікація та обов'язкове навчання персоналу
	Ризик невідповідності навичок бізнес-цілям	Зниження ризику	Адаптація кадрів через навчальні проекти
	Ризик втрати ключових знань	Зниження ризику	База знань, менторство, документація проектів
	Ризик браку ключових компетенцій	Зниження ризику	Вивчення ринку кадрів, цільовий найм
	Ризик неуніверсальності	Зниження ризику	Крос-функціональні тренінги
	Ризик нерівномірного розподілу навичок	Зниження ризику	Матриця компетенцій, план навчання за відділами

Таблиця 2. Порівняльний аналіз моделі «7S+R» із фреймворками ISO 31000 та COSO ERM
Table 2. Comparative analysis of the 7S+R model with the ISO 31000 and COSO ERM frameworks

Критерій	Модель «7S+R»	ISO 31000	COSO ERM
Призначення	Діагностика та вдосконалення внутрішньої узгодженості й протиризикового управління	Надати універсальні принципи та настанови для організації процесу управління ризиками	Інтеграція ризик-менеджменту з бізнес-стратегією та внутрішнім контролем
Фокус	Внутрішні організаційні елементи та взаємозв'язки	Управління ризиками в будь-якому контексті (зовнішньому та внутрішньому)	Ризики, що впливають на досягнення стратегічних цілей
Рівень деталізації	Мікроскопічний: аналіз ризиків на рівні бізнес-процесів компанії	Макроскопічний: надання загальних принципів та фреймворку	Макроскопічний: управління ризиками на рівні всього підприємства
Ключові принципи	Інтеграція ризиків в усі 7 елементів McKinsey; взаємозалежність елементів	Безперервне вдосконалення, адаптивність, інтеграція в усі процеси	Інтеграція ризику з ефективністю, стратегією та культурою
Застосовність	Організаційна діагностика та трансформації	Універсальна для будь-якої організації, незалежно від типу чи розміру	Системне управління ризиками в рамках підприємства

ISO 31000 [16]: Цей міжнародний стандарт є гнучким і універсальним, він надає набір принципів та настанов для управління ризиками в будь-якій організації, незалежно від її розміру чи галузі. ISO 31000 підкреслює необхідність інтеграції ризик-менеджменту в усі бізнес-процеси, прийняття рішень та управління. Він принциповий, а не обов'язковий, що дозволяє адаптувати його до специфічних потреб організації.

COSO ERM [13]: Цей фреймворк, розроблений Комітетом спонсорських організацій Комісії Тредвея (COSO), більше сфокусований на внутрішніх контролях та інтеграції управління ризиками зі стратегічними цілями організації. Він складається з п'яти взаємопов'язаних компонентів: середовища контролю, оцінки ризиків, контрольних заходів, інформації та комунікації, а також моніторингу. COSO ERM є ідеальним для організацій, що прагнуть глибоко вбудувати ризик-менеджмент у свої стратегічні процеси.

Порівняння в табл. 2 наведене не з метою показати модель «7S+R» як альтернативу ISO 31000 чи COSO ERM, а, навпаки, як їхнє корисне доповнення. Тоді як ISO 31000 та COSO ERM надають широку, макроскопічну структуру для корпоративного управління ризиками, модель «7S+R» є мікроскопічним, діагностичним інструментом, який дозволяє застосувати ці принципи на рівні конкретних організаційних елементів. Компанія може використовувати принципи ISO 31000 для визначення загального підходу до ризиків, а

потім застосовувати модель «7S+R» для виявлення та усунення конкретних внутрішніх прогалин, що створюють ризики в кожному із «S»-елементів. Це дозволяє перейти від абстрактної концепції до конкретних, цільових дій.

Висновки. По-перше, модель McKinsey 7S проаналізовано як ефективний інструмент оцінювання внутрішньої узгодженості організації, що дозволяє ідентифікувати як «жорсткі», так і «м'які» чинники впливу на бізнес-процеси.

По-друге, систематизовано основні підходи та стандарти управління ризиками, що дало змогу визначити їхні обмеження щодо мікрорівневої організаційної діагностики.

По-третє, обґрунтовано доцільність інтеграції елемента Risk у модель 7S як наскрізного виміру, що відображає джерела та прояви ризиків у кожному з організаційних компонентів.

По-четверте, розроблено концептуальну модель «7S+R», яка дозволяє здійснювати системну ідентифікацію, оцінку та мінімізацію ризиків бізнес-процесів в інжинірингових компаніях.

Практична цінність моделі «7S+R» полягає у можливості її застосування керівниками та аналітиками інжинірингових компаній для виявлення внутрішніх джерел ризиків, формування програм організаційних змін і побудови культури управління ризиками.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку кількісних та нечітко-логічних методів

оцінювання ризиків у межах моделі «7S+R», а також на її емпіричну апробацію у реальних інжинірингових проєктах.

Бібліографічний список

1. Бахлюк Ю., Шевчук О. Модель McKinsey 7-S як інструмент оцінювання конкурентоспроможності підприємства. *Економіка і організація управління*. 2019. № 3(31). С. 159–167. DOI: 10.31558/2307-2318.2018.3.17
2. Вакуленко В., Райтер Н. Суть та класифікація підприємницьких ризиків. *Збірник матеріалів звітної студентської наукової конференції факультету управління, економіки та права Львівського національного університету природокористування за результатами науково-дослідної роботи у 2022 р.* С. 303–306. URL: <https://lnup.edu.ua/uk/fakultety/fakekonomik/4923-zasidannia-v-ramkakh-zvitnoi-studentskoi-naukovoi-konferentsii-za-rezultatamy-naukovo-doslidnoi-roboty-u-2022-rotsi> (дата звернення: 21.01.2025)
3. Данченко О. Б., Ткаченко Ф. В. Ідентифікація та аналіз ризиків бізнес-процесів в інжинірингових компаніях за елементами моделі McKinsey 7S. *Управління проєктами у розвитку суспільства. Тема: «Управління проєктами післявоєнної розбудови України»: тези доповідей /* відп. за вип. С. Д. Бушуєв. Київ: КНУБА, 2025. 356 с., С. 103–106. URL: http://urpm.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/10/Тези-PM_Kyiv25-1.pdf (дата звернення: 21.01.2025)
4. Запужляк І. Б. Модель McKinsey 7S як інструмент оцінювання готовності газотранспортних підприємств до змін. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2015. Вип. 3. С. 136–140. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuumevcg_2015_3_33 (дата звернення: 21.01.2025)
5. Захарова Н. Ю. Управління ризиками на підприємстві: сутність, підходи та методи. *Бізнес Інформ*. 2023. № 1. С. 203–209. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/j-pdf/binf_2023_1_30.pdf (дата звернення: 21.01.2025)
6. Коюда П. М., Коюда О. П. Характеристика та класифікація ризиків. *Комунальне господарство міст*. 2006. Вип. 71. С. 203–214. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/1356/> (дата звернення: 21.01.2025).
7. Посохов І. М. Сучасний стан методичного забезпечення управління ризиками корпорацій. *Бізнес Інформ*. 2012. № 10. С. 266–271. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1322> (дата звернення: 21.01.2025)
8. Проскура В. Ф., Білак Р. Г. Методологічні підходи до управління ризиками. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 9. С. 599–607. URL: <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/1555> (дата звернення: 21.01.2025)
9. Пуліна Т. В. Сучасні аспекти та методи управління ризиками інноваційних проєктів в Україні. *Економіка та держава*. 2017. № 10. С. 4–8. URL: <http://www.economy.in.ua/?op=1&z=3871&i=0> (дата звернення: 21.01.2025)
10. Стандарт управління проєктами та Настанова до зводу знань з управління проєктами (PMBOK® Guide). 7-ме вид. Newtown Square, PA: Project Management Institute, Inc., 2021. 370 p.
11. Цвігун Т. В. Класифікація ризиків підприємства. *Економічні науки. Сер.: Облік і фінанси*. Луцьк: Луц. нац. техн. ун-т, 2011. Вип. 8(29), ч. 4. С. 385–393. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/784692c0-c316-41bf-ae7-6165d4d004b8> (дата звернення: 21.01.2025)
12. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). 6th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017. P. 395–458.
13. Enterprise Risk Management. URL: <https://www.coso.org/SitePages/Guidance-on-Enterprise-Risk-Management.aspx?web=1> (дата звернення: 21.01.2025)
14. Hayes J. *The Theory and Practice of Change Management*. London: Palgrave Macmillan, 2014. P. 137. URL: [https://dmishikantjha.com/booksCollection/THE%20theory%20and%20practice%20of%20change%20management%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://dmishikantjha.com/booksCollection/THE%20theory%20and%20practice%20of%20change%20management%20(%20PDFDrive%20).pdf) (дата звернення: 21.01.2025)
15. ISO 22301 — Business Continuity Management Systems. URL: <https://www.iso.org/standard/75106.html> (дата звернення: 21.01.2025)
16. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html> (дата звернення: 21.01.2025)
17. Kevin Stine, Stephen Quinn, Greg Witte, R. K. Gardner. *Integrating Cybersecurity and Enterprise Risk Management (ERM)*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2020. 74 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8286>
18. ONR 49000 — Risk Management for Organizations and Systems.
19. Risk management standard. URL: <https://www.ferma.eu/app/uploads/2011/11/a-risk-management-standard-english-version.pdf> (дата звернення: 21.01.2025)

Стаття надійшла 25.01.2025

**ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 614.8

**АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ОСНОВНИХ ВИДІВ ПОДІЙ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ,
ГОСТРИХ ПРОФЕСІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ (ОТРУСНЬ) І АВАРІЙ**

*Іван Городецький¹, к. т. н., Василь Тимочко¹, к. т. н., Ігор Окіпний², к. т. н.,
Олексій Швець¹, к. т. н., Олексій Бурнаєв¹, к. ф.-м. н., Віктор Семерак¹, к. т. н.*

*¹Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна
e-mail: ivanhorod@gmail.com.*

*²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56,
м. Тернопіль, Україна, e-mail: i.okipnyi@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.249-259>

Городецький І., Тимочко В., Окіпний І., Швець О., Бурнаєв О., Семерак В. Аналіз динаміки основних видів подій нещасних випадків, гострих професійних захворювань (отруєнь) і аварій

Проаналізовано стан досліджень виробничого травматизму загалом і, зокрема, в енергетиці, сільському господарстві, автомобільному транспорті тощо; наголошено на встановлених причинах нещасних випадків і необхідності більш детальної характеристики небезпечних подій. Охарактеризовано різні варіанти класифікації шкідливих і небезпечних виробничих факторів із невідповідностями у нормативно-правових актах, а також класифікацію небезпечних подій, що складається з 24 позицій. Встановлено, що найбільш небезпечними за аналізований період часу (2017-2021 рр.) були події: 1 – падіння працівника (747-1095 осіб); 2 – падіння предметів і матеріалів на потерпілого (418-593); 3 – події під час руху транспортних засобів – дорожньо-транспортні пригоди (293-482); 4 – падіння працівника з висоти (319-413); 5 – дія предметів та деталей, що рухаються. Іншими подіями зі значними летальними наслідками були: ураження електричним струмом (у 2018 р. загинуло 27 осіб, у 2022 р. — 24 особи); пожежі (4 і 12 осіб відповідно); погіршення стану здоров'я (14 і 13); вибухи (3 і 11 осіб); дія шкідливих і токсичних речовин (8 і 6 осіб) тощо. Проаналізовано витрати підприємств, що зумовлені нещасними випадками – від 566600,27 тис. грн у 2019 р до 212376,35 тис. грн у 2021 р. Виявлено зростання відшкодувань згідно з листком непрацездатності з 94293,02 тис. грн до 190059,51 тис. грн за аналізовані роки. Значні суми витрат припадають на вартість зіпсованого у зв'язку з нещасним випадком устаткування, інструменту, зруйнованих будівель, споруд, та порівняно невеликі суми на штрафи посадовим особам підприємств за порушення вимог законодавства про охорону праці. У 2022 р. найбільша кількість потерпілих осіб із летальним наслідком була під час подій суспільного життя (війна, терористичний акт, блокада тощо) – 156 осіб. Окреслено основні нормативно-правові акти (правила, регламенти, норми, положення, стандарти, інструкції), дотримання яких дає змогу зменшити вплив на працівників небезпечних і шкідливих виробничих чинників та, відповідно, ризик виникнення небезпечних подій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз схем і обставин виникнення небезпечних подій та, відповідно, на розроблення заходів щодо зниження їх кількості.

Ключові слова: нещасний випадок, гостре професійне захворювання (отруєння), аварія, небезпечна подія.

Horodetskyi I., Tymochko V., Okipnyi I., Shvets O., Burnaiev O., Semerak V. Analysis of the dynamics of the major types of workplace accidents, acute occupational diseases (such as poisonings), and other incidents

The study reviews the current state of research on industrial injuries, particularly within sectors like energy, agriculture, and road transport. The analysis emphasizes the need to better characterize the causes of accidents and dangerous events. Various methods for classifying harmful and dangerous production factors are highlighted, alongside inconsistencies found in regulatory legal acts. A classification of dangerous events, which includes 24 categories, is also provided. The analysis reveals that the most prevalent and dangerous events between 2017 and 2021 were as follows: 1. employee falls (747-1095 incidents); 2. falling objects and materials on victims (418-593 incidents); 3. vehicle-related accidents (293-482 incidents); 4. falls from height (319-413 incidents); 5. incidents involving moving objects and parts. Other events with a significant number of fatal consequences included electric shocks (27 deaths in 2018 and 24 in 2022), as well as fatalities from fires (4 and 12 people respectively), health deterioration (14 and 13), explosions (3 and 11), and exposure to harmful and toxic substances (8 and 6). The financial impact of accidents on enterprises was also examined, showing costs ranging from 566,600.27 thousand UAH in 2019 to 212,376.35 thousand UAH in 2021. There was an increase in compensation claims,

as indicated by certificates of incapacity, rising from 94,293.02 thousand UAH to 190,059.51 thousand UAH during the analyzed years. Significant expenses were incurred for equipment, tools, and the destruction of buildings and structures due to accidents, while fines imposed on officials for violating labor safety legislation were relatively minor. In 2022, the highest number of fatalities occurred during public life events, such as war, terrorist acts, and blockades, resulting in 156 deaths. Key regulatory legal acts (including rules, regulations, norms, orders, standards, and instructions) have been identified, compliance with which can help mitigate the impact of dangerous and harmful production factors on employees. Future research should focus on analyzing the patterns and circumstances surrounding the occurrence of dangerous events to develop measures to decrease their frequency.

Keywords: accident, acute occupational disease (poisoning), breakdown, dangerous event.

Постановка проблеми. Проблема нещасних випадків, гострих професійних захворювань (отруєнь) і аварій на виробництві є досить актуальною, незважаючи на значний технічний прогрес, організаційно-управлінський розвиток діяльності та технічних засобів безпеки праці тощо, оскільки під час різних видів робіт, робочих рухів виникають і впливають на працівників небезпечні та шкідливі виробничі чинники з відповідними негативними наслідками. Різні виробничі та обслуговочі операції характерні наявністю небезпечних дій у рухомих або нерухомих робочих зонах, небезпечних умов і обставин, негативними наслідками яких є формування травмонебезпечних та аварійних ситуацій і, відповідно, виникнення негативних і небезпечних подій – аварій, нещасних випадків, гострих професійних захворювань (отруєнь).

Кількість виробничих нещасних випадків за останні роки, як в Україні, так і у світі, є значною. Державна служба статистики України вказує на щорічне зростання загальної кількості травмованих від 4040 осіб у 2018 р. до 12315 осіб – у 2021 р. [18]. Небезпечні події на дорогах у світовому вимірі спричинюють загибель близько 1,35 млн осіб, що призводить до втрати країнами близько 3 % внутрішнього валового продукту [26]. За даними Відділу статистики праці Департаменту праці США кількість летальних нещасних випадків коливається від 4700 до 5190 за 2011-2021 рр., що відповідає показнику виробничого травматизму з летальними наслідками у межах 2,7-3,5 (на 100 тис. працівників) за аналогічний період [27]. Результати досліджень переважно стосуються динаміки та причин нещасних випадків, однак для глибшого розуміння механізмів виробничого травматизму необхідно детальніше розглянути й проаналізувати види подій, що спричинюють нещасні випадки, гострі професійні захворювання (отруєння) та аварії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обставини та небезпечні події, що виникають на підприємствах, автомобільних дорогах та інших

об'єктах і призводять до травмонебезпечних ситуацій, всебічно досліджуються як в Україні, так і за кордоном [1-5; 10; 12-15; 19-25; 29-31]. Праці присвячені аналізу причин травматизму в різних галузях, впливу різних чинників на безпеку праці, вивченню небезпечних і шкідливих факторів, розробленню заходів для запобігання формуванню травмонебезпечних і аварійних ситуацій, а також оптимізації безпекової інфраструктури тощо.

У праці [21] теоретично досліджено вплив різних видів шкідливих виробничих факторів, розроблено моделі оцінки професійних ризиків, зокрема отримано вирази для визначення рівнів накопичення у працівника негативного впливу внаслідок дії шкідливих виробничих факторів, однак практично не реалізовано процес оцінки професійних ризиків для отримання необхідних кількісних результатів на основі чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь та граничних умов. Подібно, у праці [3] розроблено логічну модель процесу перебігу подій-небезпек із формуванням можливого наслідку у вигляді травмування працівника під час роботи сільськогосподарських мобільних енергетичних засобів на зерноскладах із використанням приводу від валу відбору потужності. Вказано про небезпеку травмування для механізаторів через недоліки конструкцій сільськогосподарської техніки, однак не подано числових значень для оцінки ризиків.

Автори [1; 9; 12; 20] досліджували проблеми виробничого травматизму, основних груп причин, ризиків електротравмування на об'єктах підприємств електричних станцій, в умовах експлуатації силового та комутаційного обладнання. Вказано на значну кількість нещасних випадків зі смертельними наслідками в енергетичній галузі від подій ураження електричним струмом (55 % від загальної кількості). Наголошено на напрямках мінімізації ризиків електротравматизму в електроустановках надвисоких класів, упровадження циклічного інформаційного контуру, логічно обґрунтованих рішень для мінімізації ризику електротравм, однак

не наголошено на окремому дослідженні подій, що супроводжують формування небезпечних ситуацій експлуатації електроустановок тощо.

У працях [2; 4] автори досліджували причини травматизму у сільському господарстві, шкідливі та небезпечні чинники у галузях рослинництва і тваринництва, напрями запобігання травмонебезпечних ситуацій, застосування технологій та методів захисту (додаткове обладнання, огороження, контроль вмісту шкідливих газів, пилу, застосування засобів індивідуального захисту тощо). У [15; 19] досліджено специфіку сільськогосподарського виробництва, яка впливає на виробничий травматизм, зокрема найбільш травмонебезпечний період року (час жнив і початок осінніх польових робіт), вказано про важливість функції контролю у період найбільш інтенсивних сільськогосподарських робіт.

Окремий напрям досліджень присвячено подіям у транспортній сфері. Автори [10; 31] характеризують дорожні транспортні пригоди (ДТП) та наголошують на їхніх причинах, передусім за кордоном, зокрема в Польщі, окремо зазначаючи аварії, спричинені недоліками системи освітлення та несправностями гальмівної системи. Наголошено на зростанні кількості ДТП і травмуваннях, зокрема дітей до 14 років, наявності нетверезих учасників руху. Автор [28] аналізував летальні випадки на дорогах залежно від віку автомобілів і наголосив, що важкі травмуваннях у ДТП виникають у три рази більше з автомобілями старшими за 5 років. З метою запобігання аварій автори [4-5] аналізували причини небезпечних подій на транспорті і встановили найбільшу небезпеку від перевищення безпечної швидкості, маневрування, порушення правил проїзду на перехрестях, недотримання дистанції під час руху на дорозі тощо. Динаміка травматизму під час ДТП має негативну тенденцію зростання від 24294 до 26141 випадків за останні роки, тому потрібно планувати профілактичні заходи. Автори [22; 30] наголошують на гібридному підході до дослідження факторів, пов'язаних із тяжкістю травм у ДТП, інтеграції інтерпретованого машинного навчання з логістичними моделями, розроблення моделей опорних векторів для аналізу тяжкості травм у робочих зонах.

Аналіз виробничого травматизму в галузі машинобудування [4; 13] показав проблеми, як за загальною кількістю травмованих, так і щодо важкості. Автори вказують на санітарно-гігієнічні норми, велику кількість машин, механізмів, потребу покращення стану безпеки технологічних

процесів. Окремо наголошується на помилках позиціонування [23-24], які можуть призводити до травмонебезпечних ситуацій; на вдосконаленні організації робочих місць [25]; на динаміці причин нещасних випадків [14] та потребі науково обґрунтованих рекомендацій із профілактики нещасних випадків на основі дослідження небезпечних подій; на оптимізації безпекової інфраструктури [29] із прогнозуванням ризиків виникнення надзвичайних ситуацій; моделюванні для визначення можливих варіантів територіального розташування пожежно-рятувальних підрозділів; використанні методів кластеризації зон ризику, аналізі транспортної мережі тощо. Інтегрування засобів обчислювального інтелекту у ці процеси суттєво підвищує безпеку реалізації проектів.

Отже, у проаналізованих дослідженнях широко висвітлюються причини нещасних випадків, тоді як питання травмонебезпечних подій розкрито дещо обмежено. Тому необхідно детальніше розглянути та проаналізувати динаміку видів подій, що спричинюють нещасні випадки, гострі професійні захворювання (отруєння) та аварії.

Постановка завдання. Наше завдання – характеристика та аналіз основних видів подій – нещасних випадків, гострих професійних захворювань (отруєнь) та аварій в Україні, а також аналіз спричинених ними втрат підприємств і, відповідно, окреслення запобіжних заходів для зниження рівня виробничого травматизму.

Виклад основного матеріалу. Діяльність підприємств супроводжується наявністю низки професійних ризиків у зв'язку із шкідливими та небезпечними чинниками чи факторами, які періодично призводять до втрати працездатності працівників через нещасні випадки, гострі професійні захворювання (отруєння) і аварії. Поняття «професійний ризик» у документі [6] – Державних санітарних нормах і правилах «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» (далі – Гігієнічна класифікація праці) – визначається як «величина ймовірності порушення (ушкодження) здоров'я працівника з урахуванням тяжкості наслідків внаслідок несприятливого впливу факторів виробничого середовища та трудового процесу». Також у цьому документі вказано, що гігієнічну оцінку професійного ризику проводять з урахуванням величини експозиції цих факторів, показників стану здоров'я працівника та втрати ним працездатності.

Відповідно до Гігієнічної класифікації праці термін «небезпечний виробничий фактор» визначається як «фактор середовища та трудового процесу, який може спричинити гостре захворювання (отруєння), раптове різке погіршення здоров'я або смерть». Термін «шкідливий виробничий фактор», як «фактор середовища або трудового процесу, вплив якого на працівника за певних умов (інтенсивність, тривалість дії тощо) може спричинити професійне або виробничо зумовлене захворювання, тимчасове або стійке зниження працездатності, підвищення частоти соматичних та інфекційних захворювань, призвести до порушення здоров'я як працівника, так і його нащадків». Також у цьому документі означено термін «професійне захворювання» як «захворювання, що виникло внаслідок професійної діяльності працівника та зумовлюється виключно або переважно впливом шкідливих факторів виробничого середовища і трудового процесу», та подано класифікацію шкідливих виробничих факторів на: 1) фізичні (мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); барометричний тиск; неіонізуючі електромагнітні поля та інші випромінювання: електростатичні поля, постійні магнітні поля, електричні та магнітні поля промислової частоти (50 Гц), електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, електромагнітні випромінювання оптичного діапазону, зокрема лазерне та ультрафіолетове; іонізуючі випромінювання; виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (відсутність або недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря); 2) хімічні (речовини хімічного походження, деякі речовини біологічної природи, які отримані хімічним синтезом, аерозолі фіброгенної дії (пил)); 3) біологічні (мікроорганізми – продуценти, живі клітини та спори мікроорганізмів, що містяться в бактеріальних препаратах, патогенні мікроорганізми) і 4) трудового процесу (важкість і напруженість праці). Небезпечних виробничих факторів у цій класифікації не згадують, напевне з таких міркувань, що в ДСТУ2293-14 [7] зазначено, що залежно від кількісної характеристики (рівня, концентрації тощо) і тривалості впливу небезпечним чинником може ставати шкідливий, відповідно вказана класифікація поширюється і на нього. Також у цьому стандарті означено поняття травми і виробничої травми.

У нормативних актах поняття «травмування на виробництві» не вживається; подію, що призводить до втрати працездатності, називають

«нешасним випадком на виробництві», як у «Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві» (далі – Порядок) [16], так і в Законі України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [8]. Так, у зазначеному Законі визначено, що «нешасний випадок – обмежена в часі подія або раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, що сталися у процесі виконання ним трудових обов'язків, внаслідок яких заподіяно шкоду здоров'ю працівника або настала його смерть».

Дещо розширене визначення наводиться у Порядку: «нешасний випадок – обмежена в часі подія або раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, що сталися у процесі виконання ним трудових обов'язків або в дорозі (на транспортному засобі підприємства чи за дорученням роботодавця), внаслідок яких заподіяно шкоду здоров'ю, зокрема від одержання поранення, травми, у тому числі внаслідок тілесних ушкоджень, гострого професійного захворювання (отруєння) та інших отруєнь, одержання сонячного або теплового удару, опіку, обмороження, а також у разі утоплення, ураження електричним струмом, блискавкою та іонізуючим випромінюванням, одержання інших ушкоджень внаслідок аварії, пожежі, стихійного лиха (землетрусу, зсуву, повені, урагану тощо), контакту з представниками тваринного та рослинного світу, які призвели до втрати працівником працездатності на один робочий день чи більше або до необхідності переведення його на іншу (легшу) роботу не менш як на один робочий день, зникнення тощо». Таке деталізоване незакінчене визначення, що містить також згадування професійного захворювання (отруєння – хоча у цьому документі також окремо визначено цей термін), деякі повторення, можна пояснити характером документа, як інструкції до дії за умови настання відповідної події.

Окремо варто зазначити, що визначення гострого професійного захворювання (отруєння) у Порядку подано, як «захворювання (або смерть), що виникло після однократного (протягом не більш як однієї робочої зміни) впливу на працівника шкідливих факторів фізичного, біологічного та хімічного характеру (у тому числі інфекційні, паразитарні, алергійні захворювання)». Відомо, що виробничі чинники, які призводять до гострого погіршення стану здоров'я, є небезпечними, а не шкідливими, як зазначено у цьому та інших визначеннях.

У додатку 12 Порядку об'єднали шкідливі з небезпечними факторами виробничого середовища

та трудового процесу і подали перелік у дещо іншій класифікації, яка містить 9 розділів (1 – хімічні та біологічні фактори; 2 – пил; 3 – шум, ультразвук, інфразвук; 4 – вібрація; 5 – неіонізуюче випромінювання; 6 – мікроклімат; 7 – фактори трудового процесу; 8 – освітленість; 9 – іонізуюче випромінювання).

Інші терміни подій, які призводять до втрати працездатності, а саме аварія, пожежа, стихійне лихо, детально означені у Кодексі цивільного захисту України [11]. Основне поняття цього Кодексу «надзвичайна ситуація» містить інформацію про небезпечну подію – «обстановка на окремій території чи суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, яка характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завдання значних матеріальних збитків, а також до неможливості проживання населення на такій території чи об'єкті, провадження на ній господарської діяльності». Зокрема, «дорожньо-транспортна пригода - це подія, що сталася під час руху дорожнього транспортного засобу, внаслідок якої загинули або зазнали травм люди чи заподіяна шкода майну». Варто було б вказати, що це небезпечна подія, оскільки є травмовані люди або пошкоджене майно. Аварію визначено, як «...небезпечну подію техногенного характеру, що спричинила ураження, травмування населення або створює на окремій території чи території суб'єкта господарювання загрозу життю або здоров'ю населення та призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу чи спричиняє наднормативні, аварійні викиди забруднюючих речовин та інший шкідливий вплив на навколишнє природне середовище». До визначення варто додати про небезпечний, а не тільки шкідливий вплив, адже йдеться про «наднормативні, аварійні викиди забруднюючих речовин». У цьому ж документі означено поняття небезпечної події, як «подія, у тому числі катастрофа, аварія, пожежа, стихійне лихо, епідемія, епізоотія, епіфітотія, яка за своїми наслідками становить загрозу життю або здоров'ю населення чи призводить до завдання матеріальних збитків». У цьому визначенні варто б додати та інші (події), бо тут перераховано тільки 7 позицій.

У додатку 9 Порядку [16] подано класифікацію видів подій, причин, обладнання, устаткування, машин, механізмів, транспортних засобів, що призвели до настання нещасного випадку, гострого професійного захворювання (отруєння), аварій. Чітко означено 23 види подій (і 24-та - інші), що призводять до нещасного випадку, гострого професійного захворювання (отруєння), аварій: 1) пригоди (події) під час руху транспортних засобів усіх видів (у т.ч. наїзд транспортних засобів на потерпілого на дорогах (шляхах) загального користування, на території підприємства) та ін.; 2) падіння потерпілого (під час пересування, з висоти, в яму, колодязь, ємкість тощо); 3) падіння, обрушення, обвалення предметів, матеріалів, породи, ґрунту, загалом 5 позицій (обвалення будівель, споруд та їх елементів, породи, ґрунту тощо, зсув, перекидання транспортних засобів, мобільних засобів праці, падіння устаткування (обладнання) або їх конструктивних елементів, падіння предметів, матеріалів, дерев, гілок дерев, матеріалів, інструментів, пристроїв тощо) тощо; 4) дія предметів та деталей, що рухаються, розлітаються, обертаються (2 позиції): дія рухомих і таких, що обертаються, деталей обладнання, машин і механізмів; дія предметів, що розлітаються, чи робочих середовищ, що вивільняються в результаті вибуху або руйнування технологічного обладнання, устаткування тощо, які перебувають під тиском, у вакуумі; 5) ураження електричним струмом (5 позицій): у разі дотику до струмопровідних частин електроустановки, що перебувають під напругою, до ліній електропередачі та обірваних (оголених) проводів; у разі наближення на недопустиму відстань до струмопровідних частин електроустановки, що перебувають під напругою, до ліній електропередачі та обірваних (оголених) проводів; у разі дії блискавки; у разі дії електричної дуги; у разі дії напруги кроку; 6) дія температур (2 позиції): дія підвищених температур (крім пожежі); дія низьких температур (обмороження) тощо. Загалом класифікація подій чітка, за винятком формулювань позицій 9 і 10, де означено не події, а показники, а також не деталізовано інші події (позиція 24).

Відповідно до інформації Державної служби статистики України, Державної служби України з питань праці та Фонду соціального страхування України [17-18] сформовано табл. 1. Варто зазначити, що Державна служба статистики періодично змінює форми подання матеріалу, об'єднує види економічної діяльності у розділи, секції, змінює кількість таблиць, також дані про травматизм Фонду соціального страхування України і Державної служби статистики України дещо відріз-

няються. Тому є певні труднощі для аналізу стану травматизму у динаміці за роками, його причинами, подіями і, відповідно, управління ними.

Для розуміння впливу небезпечних подій на працівників у табл. 1 показано розподіл кількості потерпілих від нещасних випадків за 2018 і 2022 роки.

Аналіз кількості потерпілих від нещасних випадків у 2018 р., які призвели до втрати працездатності, показує, що окремі види небезпечних подій потребують особливої уваги: перше місце займає подія падіння потерпілого – 1309 осіб (для 53 осіб ця подія була летальною), з яких 278 осіб травмувалися під час падіння з висоти (37 з

летальними наслідками); на другому місці – дія предметів та деталей, що рухаються – 682 особи (31 з летальними наслідками); на третьому – події на транспорті (дорожньо-транспортні пригоди) – 568 осіб (61 із летальними наслідками); на четвертому місці – падіння на працівників предметів, матеріалів, породи, ґрунту – 523 особи (36 з летальними наслідками); на п'ятому – інші види подій – 465 осіб (15 з летальними наслідками); на шостому – навмисна травма, заподіяна іншою особою, – 156 осіб (7 із летальними наслідками). За аналізований рік не було випадків зникнення, самогубств або впливу іонізуючих випромінювань.

Таблиця 1. Кількість потерпілих від нещасних випадків, які призвели до втрати працездатності залежно від небезпечних подій, осіб

Table 1. Number of victims of accidents that led to loss of working capacity depending on dangerous events, persons

Вид події	2018 р. – усього / зі смертельним наслідком	2022 р. – усього / зі смертельним наслідком
Усього	4 040/275	4877/437
пригоди (події) на транспорті	568/61	290/59
падіння потерпілого	1 309/53	897/57
з них із висоти	278/37	236/48
падіння предметів, матеріалів, породи, ґрунту тощо	523/36	352/35
дія предметів та деталей, що рухаються, розлітаються	682/31	399/26
ураження електричним струмом	71/27	65/24
дія температур	72/1	23/-
дія шкідливих і токсичних речовин	39/8	21/6
показники важкості праці	1/-	-
показники напруженості праці	2/1	-
контакт із представниками фауни та флори	69	31/2
утоплення	4/4	5/5
асфіксія	6/6	4/4
навмисна травма заподіяна іншою особою	156/7	96/2
техногенна аварія	1/-	-
стихийне лихо	1/-	5/-
пожежа	17/4	28/12
вибух	9/3	48/11
газодинамічне явище	10/1	1/-
погіршення стану здоров'я	35/1	90/13
подія суспільного життя (війна, терористичний акт, блокада тощо)	-	570/156
інші види подій	465/15	1952/25

Аналіз кількості потерпілих від нещасних випадків у 2022 р. має певні особливості, оскільки почалася повномасштабна війна, яка внесла корективи у кількісні показники видів подій. На першому місці виявилися інші види травмонезбезпечних подій – 1952 осіб (25 з летальними наслідками); друге місце займає подія падіння

потерпілого – 897 осіб (для 57 осіб ця подія була летальною), з яких 236 осіб травмувалися під час падіння з висоти (48 з летальними наслідками); на третьому – події суспільного життя (війна) – 570 осіб (156 з летальними наслідками); на четвертому місці – дія предметів та деталей, що рухаються – 399 осіб (26 з летальними наслідками); на п'ятому

місці – падіння на працівників предметів, матеріалів, породи, ґрунту – 352 особи (35 з летальними наслідками); на шостому – події на транспорті (дорожньо-транспортні пригоди) – 290 осіб (59 з летальними наслідками); на сьомому – навмисна травма заподіяна іншою особою – 96 осіб (2 з летальними наслідками). За аналізований рік не було подій зникнення, самогубств, впливу іонізуючих випромінювань, впливу подій, які характеризуються показниками важкості і напруженості праці, а також пов’язаних з техногенними, екологічними аваріями. Іншими подіями зі значними летальними наслідками були: ураження електричним струмом (у 2018 р. загинуло 27 осіб, у 2022 р.

– 24 особи); пожежі (4 і 12 осіб відповідно); погіршення стану здоров’я (14 і 13); вибухи (3 і 11 осіб); дія шкідливих і токсичних речовин (8 і 6 осіб) тощо. На рис. 1-2 подано результати статистичних досліджень травматизму за видами основних подій (падіння працівника, падіння працівника з висоти, події під час руху транспортних засобів – дорожньо-транспортні пригоди, падіння предметів і матеріалів, дія предметів та деталей, що рухаються) за період з 2017 р. до 2021 р. [17-18].

У результаті події «Падіння потерпілого» було від 747 до 1095 травмованих осіб за аналізований період, а від події «Падіння потерпілого з висоти» – відповідно від 328 до 413 осіб (рис. 1 а, б).

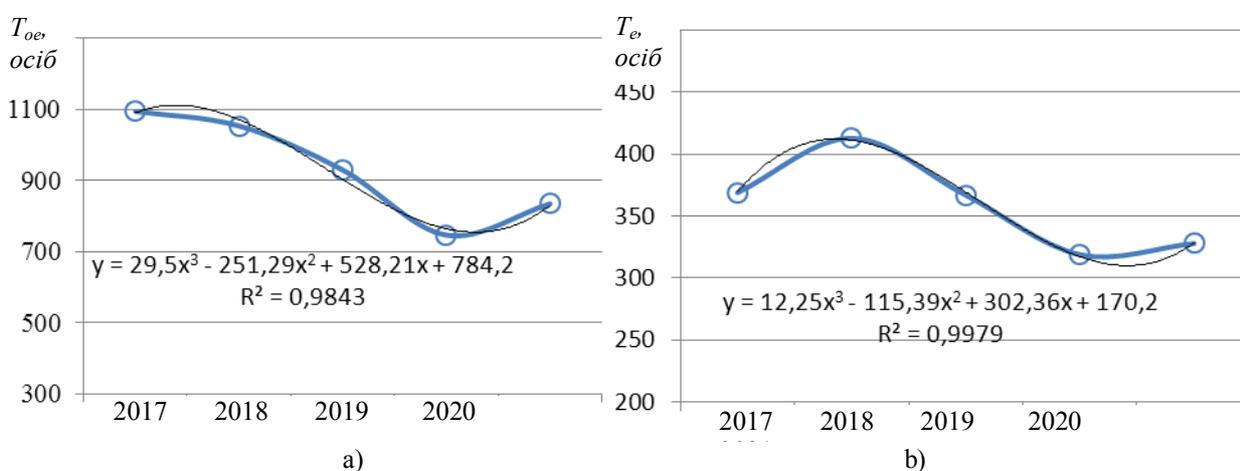


Рис. 1. Оцінка динаміки небезпечних подій: а) – кількість потерпілих від випадків «Падіння потерпілого», осіб (T_{oe}); б) – кількість потерпілих від випадків «Падіння потерпілого з висоти», осіб (T_e).

Fig. 1. Assessment of the dynamics of hazardous events: а) – number of victims from “Employee falls” cases, persons (T_{oe}); б) – number of victims from “Falls from height” cases, persons (T_e).

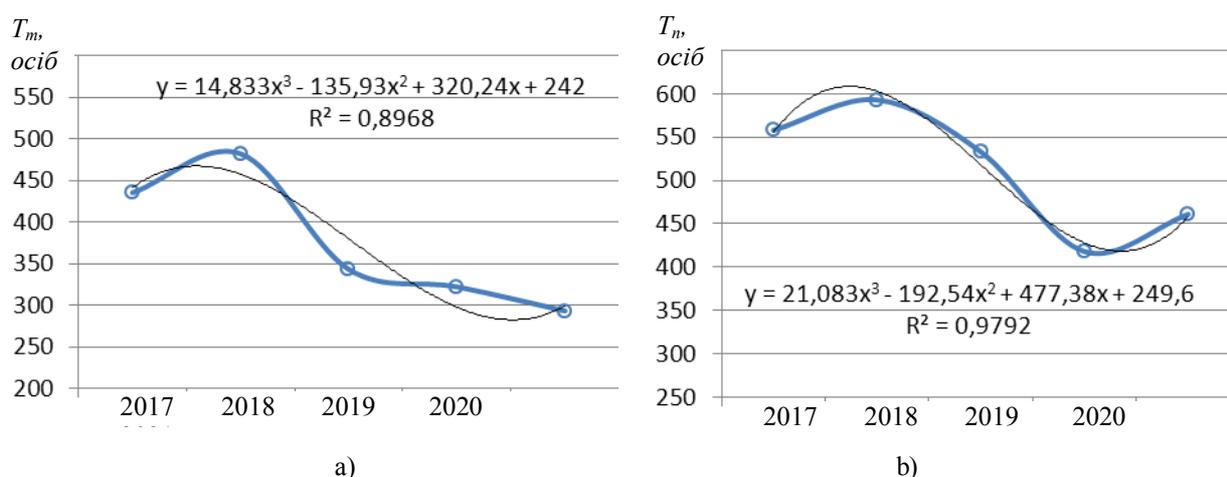


Рис. 2. Оцінка динаміки небезпечних подій: а) – кількість потерпілих від випадків «Події під час руху транспортних засобів», осіб (T_m); б) – кількість потерпілих від випадків «Падіння на потерпілого предметів та матеріалів», осіб (T_n).

Fig. 2. Assessment of the dynamics of hazardous events: а) – the number of injured persons of “Vehicle-related accidents” (T_m); б) – the number of injured of “Falling objects and materials on victims” (T_n).

Графічні та аналітичні залежності показують динаміку нещасних випадків за минулі роки, що також дає змогу прогнозувати небезпечні події за допомогою засобів MS EXCEL зі змінами аналізованих явищ на майбутнє. Динаміка випадків травматизму (рис. 1, а і б) показує, що позитивна тенденція зниження кількості подій «Падіння потерпілого» і «Падіння потерпілого з висоти» змінюється зростанням. Травматизм описано поліноміальними функціями із задовільною достовірністю апроксимації. Зростання кількості травмованих свідчить про потребу вдосконалення управління умовами та безпекою праці для запобігання вказаних небезпечних подій, додаткового аналізу схем та причин процесів їхнього розвитку.

Також побудовано графічні й отримано аналітичні залежності за допомогою засобів MS EXCEL, які показують динаміку за минулі роки інших поширених небезпечних подій, а саме «Події під час руху транспортних засобів» або дорожньо-транспортні пригоди (рис. 2 а) (подія, що сталася під час руху транспортного засобу, внаслідок якої загинули або поранені люди чи завдані матеріальні збитки), під час яких було від 293 до 482 травмованих осіб за аналізований період, і «Падіння на потерпілого предметів та матеріалів» (рис. 2 б) з відповідно від 418 до 593 травмованих осіб.

Щодо дорожньо-транспортних пригод, основною проблемою є перевищення безпечної швидкості,

порушення правил маневрування; порушення правил проїзду пішохідних переходів; порушення правил проїзду перехресть; недотримання дистанції; керування транспортним засобом у нетверезому стані тощо [3].

Оцінка динаміки випадків травматизму показала, що позитивна тенденція зниження кількості небезпечних подій змінюється зростанням. Травматизм описано поліноміальними функціями із задовільною достовірністю апроксимації. Такий стан травматизму і негативні показники зростання свідчать про потребу вдосконалення управління умовами та безпекою праці для запобігання окреслених небезпечних подій, додаткового аналізу схем та причин процесів їх розвитку, моніторингу стану безпеки у підприємствах. Загалом дані табл. 1 та рисунків 1–2 свідчать, що за аналізований період найбільш небезпечними подіями були: 1-ше місце – падіння працівника; 2-ге – падіння предметів і матеріалів на потерпілого; 3-тє – події під час руху транспортних засобів (дорожньо-транспортні пригоди); 4-тє – падіння працівника з висоти; 5-тє – дія рухомих предметів та деталей (не відображено на графіках).

Аналіз подій виробничого травматизму вказує на недоліки робіт у цьому напрямку, які призводять до значних витрат у підприємствах останніми роками (рис. 3) [17–18].

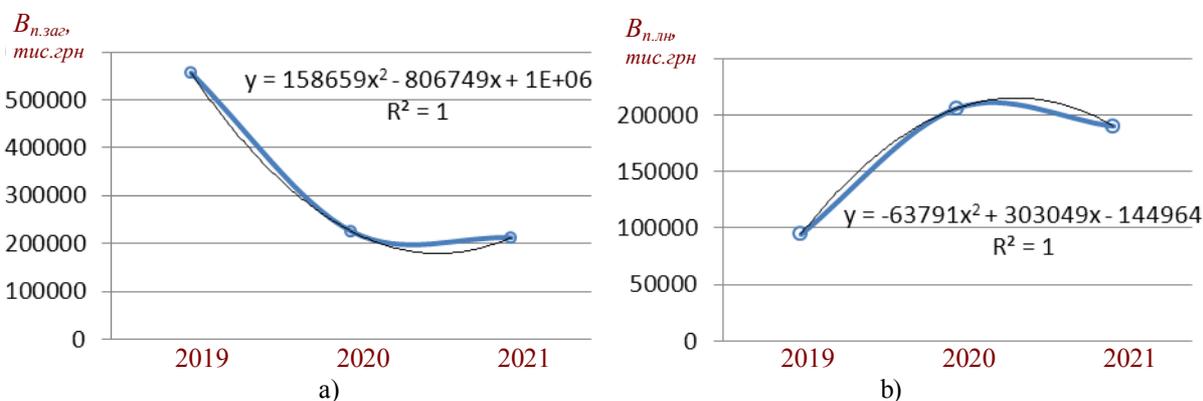


Рис. 3. Оцінка динаміки витрат підприємств, зумовлених нещасними випадками, тис. грн: а – загальні витрати підприємств; б – відшкодування витрат згідно з листком непрацездатності.

Fig. 3. Assessment of the dynamics of enterprises expenses due to accidents, thousand UAH: а – total expenses of enterprises; б – reimbursement of expenses according to the certificate of incapacity for work.

Відомо, що внаслідок травматизму витрати підприємств формуються за рахунок: відшкодувань згідно з листком непрацездатності, компенсацій потерпілому у разі переведення на легшу роботу, вартості пошкодженого внаслідок нещасного випадку устаткування та інструменту, зруйнованих будівель і споруд, штрафів посадовим особам за порушення вимог законодавства про охорону праці, пов'язані з нещасними випадками (гострими

професійними захворюваннями (отруєннями), аваріями), зокрема за приховування таких подій, тощо. Аналіз показав зниження витрат підприємствами загалом за останні роки від 566600,27 тис. грн у 2019 р. до 212376,35 тис. грн у 2021 р. і одночасно зростання відшкодувань згідно з листком непрацездатності з 94293,02 тис. грн до 190059,51 тис. грн за аналізовані роки. Значні суми витрат припадають на вартість зіпсованого у зв'язку з нещас-

ним випадком устаткування, інструменту, зруйнованих будівель, споруд, та порівняно невеликі суми на штрафи посадовим особам підприємств за порушення вимог законодавства про охорону праці. Така структура витрат вказує на значно більшу кількість потерпілих і відносно меншу кількість подій із псуванням устаткування та інструменту чи руйнуванням будівель і споруд.

У разі настання нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій роботодавець зобов'язаний проаналізувати небезпечні події та їхні причини за підсумками відповідного періоду, розробити та виконати план заходів щодо запобігання подібних інцидентів у

майбутньому. Фахівці Державної служби України з питань праці, Пенсійного фонду України з їх територіальними органами, профспілками перевіряють, відповідно до їх компетенції, ефективність роботи з профілактики нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій і вживають заходів до усунення виявлених порушень вимог нормативних актів згідно із законодавством. У табл. 2 подано основні види небезпечних подій нещасних випадків (у порядку спадання кількості подій із летальними наслідками за 2022 р. [18]) і основні нормативно-правові акти, використання і дотримання яких дають змогу запобігти втраті працездатності.

Таблиця 2. Окремі види небезпечних подій нещасних випадків і основні нормативно-правові акти для запобігання втрати працездатності

Table 2. Certain types of hazardous events and accidents and the main regulatory acts for preventing the loss of work capacity

Вид події / кількість потерпілих осіб із летальним наслідком / кількість травмованих осіб	Основні нормативно-правові акти
1.Подія суспільного життя (війна, терористичний акт, блокада, масові заворушення тощо) 156 / 570	Базові правила безпеки під час війни, Правила антитерористичної безпеки, інструкції
2.Пригоди (події) на транспорті 59 / 290	Правила дорожнього руху, Правила охорони праці на автомобільному транспорті, інструкції
3.Падіння потерпілого 57 / 897	Галузеві правила охорони праці, робіт на висоті, правила безпечного пересування слизькою поверхнею, по сходах, інструкції, стандарти
4.Падіння потерпілого з висоти 48 / 236	
5.Падіння предметів, матеріалів, породи, ґрунту тощо 35 / 352	Галузеві правила охорони праці, інструкції, регламенти, норми, положення, стандарти
6.Дія предметів та деталей, що рухаються, розлітаються 26 / 399	Галузеві правила охорони праці, інструкції, регламенти, норми, положення, стандарти
7.Інші види подій 25/ 1952	Правила безпеки залежно від виду події, норми
8.Ураження електричним струмом 24 / 65	Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, інструкції, положення, стандарти
9.Пожежа 12 / 28	Правила пожежної безпеки у галузі, інструкції
10.Вибух 11 / 48	Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами, інструкції, стандарти
11.Дія шкідливих і токсичних речовин 6 / 21	Правила безпечного поводження з шкідливими і токсичними сполуками та речовинами, інструкції
12.Навмисне травма заподіяна іншою особою 2 / 96	Правила антитерористичної безпеки, інструкції

Дані табл. 3 вказують, що у 2022 р. найбільша кількість потерпілих осіб із летальним наслідком була під час подій суспільного життя (війна, терористичний акт, блокада тощо) – 156 осіб. Події 2-6 – є щорічно з найбільшою кількістю потерпілих під час нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом. Подія 7 займає перше місце і стосується переважно пандемії (за даними [17-18] у 2020 р. було 3128 потерпілих, і 2021 р. – 8509 осіб). Події 8-12 показують дещо менші негативні наслідки – зниження від 24 потерпілих осіб до 2. Також у цій таблиці біля кожного виду події

наведено основні нормативно-правові акти (правила, регламенти, норми, положення, стандарти, інструкції), дотримання яких дозволяє зменшувати вплив на працівників небезпечних і шкідливих виробничих чинників та, відповідно, ризик виникнення небезпечних подій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз схем і обставин виникнення небезпечних подій та розроблення заходів для зниження їх кількості.

Висновки. Окреслено проблему нещасних випадків на виробництві в Україні та в світі. Зна-

чено зростання загальної кількості травмованих: 4040 осіб у 2018 р., 4394 – у 2019 р., 6646 – у 2020 р. та 12 315 – у 2021 р. Проаналізовано стан досліджень виробничого травматизму загалом і, зокрема, в енергетиці, сільському господарстві, автомобільному транспорті тощо; наголошено на встановлених причинах нещасних випадків і необхідності більш детальної характеристики небезпечних подій.

Охарактеризовано різні варіанти класифікації шкідливих і небезпечних виробничих факторів із невідповідностями у нормативно-правових актах, а також класифікацію небезпечних подій, що складається з 24 позицій. Встановлено, що найбільш небезпечними за аналізований період часу (2017-2021 рр.) були події: 1 – падіння працівника (747-1095 осіб); 2 – падіння предметів і матеріалів на потерпілого (418-593); 3 – події під час руху транспортних засобів – дорожньо-транспортні пригоди (293-482); 4 – падіння працівника з висоти (319-413 осіб); 5 – дія предметів та деталей, що рухаються. Іншими подіями зі значними летальними наслідками були: ураження електричним струмом (у 2018 р. загинуло 27 осіб, у 2022 р. – 24 особи); пожежі (4 і 12 осіб відповідно); погіршення стану здоров'я (14 і 13); вибухи (3 і 11 осіб); дія шкідливих і токсичних речовин (8 і 6 осіб) тощо.

Проаналізовано витрати підприємств, що зумовлені нещасними випадками – від 566600,27 тис. грн у 2019 р. до 212376,35 тис. грн у 2021 р. Виявлено зростання відшкодувань згідно з листком непрацездатності з 94293,02 тис. грн до 190059,51 тис. грн за аналізовані роки. Значні суми витрат припадають на вартість зіпсованого у зв'язку з нещасним випадком устаткування, інструменту, зруйнованих будівель, споруд, та порівняно невеликі суми на штрафи посадовим особам підприємств за порушення вимог законодавства про охорону праці.

Встановлено, що у 2022 р. найбільша кількість летальних випадків серед потерпілих припала на події суспільного життя (війна, терористичний акт, блокада тощо) – 156 осіб. Інші події характеризуються значною кількістю потерпілих під час нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом. Наведено основні нормативно-правові акти (правила, регламенти, норми, положення, стандарти, інструкції), дотримання яких дозволяє зменшувати вплив на працівників небезпечних і шкідливих виробничих чинників та, відповідно, ризик виникнення небезпечних подій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз схем і обставин виникнення небезпечних подій та розроблення заходів для їхнього зменшення.

Бібліографічний список

1. Бондаренко Є. А., Вишневецький С. Я., Бондаренко А. Є. Сучасний стан електротравматизму в енергетичній галузі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-18-23>.
2. Бурнаєв О., Коруняк П., Семерак В., Пономаренко О., Тимочко В., Городецький І. Експериментальне дослідження впливу вібраційного навантаження. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. № 28. С. 48–57. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.047>.
3. Виговський С. М., Роговський І. Л. Логічна модель процесу перебігу подій-небезпек в заходах охорони праці при експлуатації МЕЗ на зерноскладах підприємств АПК. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 275. С. 325-335.
4. Городецький І., Тимочко В., Магац М., Мазур І., Березовецький А., Мазурак М. Аналіз стану виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 127–137. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
5. Городецький І., Тимочко В., Мазур І., Городецький І., Березовецький А. Аналіз динаміки причин дорожньо-транспортних пригод і прогнозування небезпечних подій. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2021. № 25. С. 182–188. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.182>.
6. Державні санітарні норми і правила. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 21.02.2025).
7. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/safetyofliving/wp-content/uploads/sites/171/2017/10/dstu_2293_2014.pdf (дата звернення: 21.02.2025).
8. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14#n344> (дата звернення: 21.02.2025).
9. Інформація про травматизм на підприємствах паливно-енергетичного комплексу. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/informatsiya-pro-travmatyzm-na-pidpryemstvakh-palyvno-enerhetychnoho-kompleksu> (дата звернення 21.02.25).
10. Коваленко Л. О. Основні причини скоєння дорожньо-транспортних пригод та їх наслідки. *Вісник Харківського НАДУ*. 2019. Вип. 86, т. II. С. 94-98. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.94.
11. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 21.02.2025).

12. Кузьменко О. О., Мезенцева І. О., Вамболь С. О., Мезенцев С. М. Зниження виробничого травматизму як шлях вирішення проблеми дефіциту кадрів і зменшення ризиків в енергетиці. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: Надійність та енергоефективність*. 2024. № 1 (8). С 55-63. DOI: 10.20998/2224-0349.2024.01.04.
13. Левченко О.Г., Ільчук О.С. Аналіз та оцінка стану виробничого травматизму в галузі машинобудування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія : Гірництво*. 2016. Вип. 30. С. 171-176.
14. Мезенцева І. О., Кузьменко О. О., Труш О. О., Вамболь С. О. Аналіз причин виробничого травматизму та шляхів його зниження в сучасних реаліях. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. Вип. 39(3-4). С. 8-14. DOI: 10.36804/nndipbor.39-3-4.2023.8-14.
15. Москалюк І., Сакун М., Безалтична О., Москалюк А., Пуріч В. Охорона праці, професійні захворювання та травматизм у сільському господарстві. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2022. Вип. 102-103. С. 33-39. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2022.102.07>.
16. Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 21.02.2025).
17. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/968023> (дата звернення: 21.02.2025).
18. Статистичні дані виробничого травматизму. URL: <http://dsp.gov.ua/> статистичні-дані-виробничого-травма-2/ (дата звернення: 21.02.2025).
19. Тимочко В., Городецький І., Березовецький А., Войналович В., Вісин О. Оцінка професійного ризику працівників хімічного захисту рослин обприскуванням. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження*. 2022. № 26. С. 185–194. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.185>.
20. Тимочко В., Городецький І., Бурнаєв О., Кохана Т., Мазур І., Войналович В., Вісин О. Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження*. 2024. № 28. С. 227–235. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
21. Vochkovskiy A. P. Elaboration of Occupational Risks Evaluation Models Considering the Dynamics of Impact of Harmful Factors. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. № 102 (2). P. 76-85. DOI 10.5604/01.3001.0014.6777.
22. Dimitrijevic B., Asadi R., Spasovic L. Application of Hybrid Support Vector Machine Models in Analysis of Work Zone Crash Injury Severity. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 2023. № 19. P. 100801.
23. Dmytriv V., Dmytriv I., Horodetskyi I., Hutsol T., Kukharets S., Cesna J., Bleizgys, R., Pietruszynska, M., Parafiniuk S., Kubon M., Horetska I. A Method for Simulating the Positioning Errors of a Robot Gripper. *Applied Sciences*. 2024. № 14. P. 6159. <https://doi.org/10.3390/app14146159>.
24. Dmytriv V., Dmytriv I., Horodetskyi I., Horodniak R., Dmytriv T. Method of Theory of Dimensions in Experimental Research of Systems and Processes. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2021. № 65 (3). P. 233-240. <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-24>.
25. Mazur M., Korenko M., Žitňák M., Shchur T., Kieľbasa P., Dostál P., Dzhidzhora O., Idzikowski A. Implementation and Benefits of the 5S Method in Improving Workplace Organisation – A Case Study. *Management Systems in Production Engineering*. 2024. № 32(4). P. 498-507. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0047>.
26. News Release. Bureau of Labor Statistics US Department of Labor. URL: <https://www.bls.gov/news.release/pdf/cfoi.pdf> (дата звернення: 21.02.2025).
27. Occupational Safety and Health Indicators. URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/safety-and-health-at-work/> (дата звернення: 21.02.2025).
28. Sicińska K. Age of a Passenger Car and Its Influence on Accidents With Fatalities in Poland. *Transport Problems*. 2019. № 14 (1). P. 105-113. DOI: 10.21307/tp.2019.14.1.10.
29. Tryhuba A., Ratushnyi R., Ratushnyi A., Koval L., Ivanusa A. Оптимізація безпекової інфраструктури у програмах післявоєнного відновлення з використанням сучасних геоінформаційних систем. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2025. № 31. С. 196-212. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.31.2025.20>.
30. Wang C., Serre T. A Hybrid Approach to Investigating Factors Associated with Crash Injury Severity: Integrating Interpretable Machine Learning with Logit Model. *Applied Sciences*. 2025. № 15(19). P. 10417. <https://doi.org/10.3390/app151910417>.
31. Zielińska E. Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. 2016. Вип. 2 (35). С. 245-251.

Стаття надійшла 23.02.2025

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**Серія
Агроінженерні дослідження
№ 29**

Редактор: С.В. Шафранська
Коректор: М. Б. Опир
Технічний редактор: Н. І. Максимюк

Перелік наукових фахових видань України, категорія «Б» (технічні науки)
Накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р., № 886 від 02.07.2020 р.
і № 1166 від 23.12.2022 р.

Наукове видання індексується в наукометричних базах даних:
Google Scholar; Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського; Crossref

Видавець:
Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни
Львівського р-ну Львівської обл., 80381,
Свідоцтво ДК № 6177 від 11.05.2018 р.

Підписано до друку 28.02.2025. Формат 60×84¹/₈.
Папір офс. Гарнітура «Таймс». Друк на різнографі.
Обл.-вид. арк. 20,51. Ум. друк. арк. 23,38.
Наклад 500. Зам. 145.

Друк Видавництво «Сполом»
вул. Краківська, 9, м. Львів, 79008
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності
Серія ДК № 2038 від 02.02.2005 р.